

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пермский государственный технический университет»

**С.С. Андрейко**

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА  
В ОБЛАСТИ ГОРНОГО ДЕЛА**

*Утверждено  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

Издательство  
Пермского государственного технического университета  
2010

УДК 622:[001+658.5

А66

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *П.А. Лыхин*  
(Горный институт Уральского отделения  
Российской академии наук);

д-р техн. наук, профессор *Н.И. Алыменко*  
(Пермский государственный университет)

**Андрейко, С.С.**

А66 Современные проблемы науки и производства в области горного дела:  
учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 338 с.

ISBN 978-5-398-00519-6

Раскрываются современное содержание и концепция горных наук. Естественно-научное содержание и методология горных наук рассматриваются как система знаний о закономерностях и способах комплексного и экологически безопасного освоения и сохранения недр на основе постоянного технологического воспроизведения их ресурсов и нового функционального назначения. Приводится новая классификация горных наук применительно к освоению и сохранению недр при добыче твердых полезных ископаемых. В соответствии с новой классификацией горных наук представлены история развития, объект, предмет и перспективные направления научных исследований в области горного недроведения, горной системологии, геотехнологии и обогащения полезных ископаемых, а также современные проблемы горного производства.

Предназначено для магистров техники и технологии, обучающихся по направлению «Горное дело», а также для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» и «Физические процессы горного производства» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622:[001+658.5

ISBN 978-5-398-00519-6

© ГОУ ВПО  
«Пермский государственный  
технический университет», 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 6  |
| 1. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ НАУК, ПРЕДМЕТ,<br>СОДЕРЖАНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ .....              | 7  |
| 1.1. Состояние горного дела в современной России .....   | 7  |
| 1.2. Современная идеология горных наук в России .....  | 11 |
| 1.3. Новая классификация горных наук .....   | 15 |
| 1.4. Пути совершенствования горного производства и новые научные<br>направления исследований ..... | 21 |
| 2. ГОРНОЕ НЕДРОВЕДЕНИЕ .....   | 25 |
| 2.1. Горнопромышленная геология .....  | 25 |
| 2.1.1. Основные положения горнопромышленной геологии .....   | 25 |
| 2.1.2. Объект, предмет и задачи горнопромышленной геологии .....                                   | 26 |
| 2.1.3. Перспективные научные задачи горнопромышленной<br>геологии .....                            | 31 |
| 2.2. Геометрия и квалиметрия недр .....  | 34 |
| 2.2.1. История развития и современное состояние геометрии<br>и квалиметрии недр .....              | 34 |
| 2.2.2. Объекты изучения и перспективные задачи геометрии недр .....                                | 42 |
| 2.3. Геомеханика .....   | 44 |
| 2.3.1. Основные положения и история развития геомеханики .....                                     | 44 |
| 2.3.2. Объекты и задачи исследований геомеханики .....   | 51 |
| 2.3.3. Приоритетные и новые научные направления в геомеханике .....                                | 57 |
| 2.4. Разрушение горных пород .....   | 62 |
| 2.4.1. Развитие научных знаний и практики в области разрушения<br>горных пород .....               | 62 |
| 2.4.2. Объект исследования и задачи в области разрушения горных<br>пород .....                     | 67 |
| 2.4.3. Современные проблемы в области разрушения горных<br>пород .....                             | 69 |
| 2.5. Рудничная аэрогазодинамика .....  | 73 |
| 2.5.1. Общие положения и развитие знаний в области рудничной<br>газодинамики .....                 | 73 |
| 2.5.2. Объекты исследований и задачи рудничной<br>аэрогазодинамики .....                           | 76 |
| 2.5.3. Научные направления современной рудничной<br>аэрогазодинамики .....                         | 78 |
| 2.6. Горная теплофизика .....  | 88 |
| 2.6.1. Основные положения и история развития .....   | 88 |
| 2.6.2. Роль процессов тепломассопереноса в освоении природных<br>ресурсов недр .....               | 92 |
| 2.6.3. Объекты, предмет и задачи горной теплофизики .....  | 96 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 2.6.4  | Приоритетные научные направления исследований в области горной теплофизики .....                             | 98  |
| 3.     | ГОРНАЯ СИСТЕМОЛОГИЯ .....  | 102 |
| 3.1.   | Теория проектирования освоения недр .....  | 103 |
| 3.1.1. | Объект, цель и направления исследований теории проектирования освоения недр .....                            | 103 |
| 3.1.2. | Методы обоснования оптимальных параметров технологической системы в теории проектирования освоения недр..... | 106 |
| 3.1.3. | Методы установления параметров техногенных геосистем в теории проектирования освоения недр .....             | 111 |
| 3.1.4. | Задачи прогнозирования в теории проектирования освоения недр.....  | 117 |
| 3.1.5. | Критерии оптимальности в теории проектирования освоения недр.....  | 120 |
| 3.2.   | Экономика освоения георесурсов.....  | 124 |
| 3.2.1. | Основные положения и история развития экономики освоения георесурсов .....                                   | 124 |
| 3.2.2. | Важнейшие современные проблемы экономики освоения георесурсов.....   | 132 |
| 3.2.3. | Перспективные направления исследований в экономике освоения георесурсов .....                                | 133 |
| 3.3.   | Горная экология.....   | 135 |
| 3.3.1. | Объект, предмет и задачи исследований горной экологии.....   | 135 |
| 3.3.2. | Причины и основные тенденции изменения экологического состояния освоения недр.....                           | 137 |
| 3.3.3. | Развитие экологических знаний и становление горной экологии .....  | 140 |
| 3.3.4. | Новые идеи и категории горной экологии.....  | 143 |
| 3.3.5. | Приоритетные научные направления в области горной экологии .....   | 149 |
| 3.4.   | Горная информатика .....   | 155 |
| 3.4.1. | Информатизация в горном деле .....   | 155 |
| 3.4.2. | Понятие, предмет и цель горной информатики.....  | 161 |
| 3.4.3. | Структура и технические средства горной информатики.....   | 164 |
| 3.4.4. | Информационные технологии.....   | 169 |
| 3.4.5. | Горное предприятие как информационный объект .....   | 171 |
| 3.4.6. | Перспективные направления исследований в горной информатике.....   | 175 |
| 4.     | ГЕОТЕХНОЛОГИЯ .....  | 180 |
| 4.1.   | Физико-техническая геотехнология .....   | 181 |
| 4.1.1. | Физико-техническая открытая геотехнология .....  | 185 |
| 4.1.2. | Физико-техническая подземная геотехнология .....   | 190 |
| 4.1.3. | Комбинированная физико-техническая геотехнология .....   | 203 |
| 4.1.4. | Физико-техническая подводная геотехнология .....   | 210 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2. Физико-химическая геотехнология .....   | 221 |
| 4.2.1. Основные понятия и определения .....  | 221 |
| 4.2.2. Методы физико-химической геотехнологии .....  | 223 |
| 4.2.3. Основные направления развития физико-химической<br>геотехнологии.....                                   | 227 |
| 4.2.4. Физико-геологические основы физико-химической<br>геотехнологии.....                                     | 228 |
| 4.2.5. Физико-химические основы геотехнологических процессов .....   | 230 |
| 4.2.6. Технологические аспекты методов физико-химической<br>геотехнологии.....                                 | 234 |
| 4.2.7. Основные направления научных исследований и задачи<br>физико-химической геотехнологии .....             | 237 |
| 4.3. Строительная геотехнология .....  | 242 |
| 4.3.1. Объекты изучения строительной геотехнологии .....   | 244 |
| 4.3.2. Становление строительной геотехнологии как науки .....  | 247 |
| 4.3.3. Основные научные направления строительной геотехнологии ...   | 251 |
| 4.4. Геотехника .....  | 267 |
| 4.4.1. Становление геотехники как горной науки .....   | 270 |
| 4.4.2. Содержание геотехники как науки и важнейшие результаты<br>исследований .....                            | 272 |
| 5. ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ .....  | 280 |
| 5.1. Основы методологии обогащения полезных ископаемых .....   | 280 |
| 5.2. Современная стратегия развития процессов первичной переработки<br>минерального и техногенного сырья ..... | 284 |
| 5.3. Технологическая минералогия .....   | 287 |
| 5.4. Дезинтеграция и подготовка минерального сырья к обогащению .....  | 303 |
| 5.5. Физические и химические процессы разделения, концентрации<br>и переработки минералов.....                 | 309 |
| 5.6. Физические и химические процессы извлечения полезных<br>компонентов из природных и техногенных вод.....   | 320 |
| 5.6.1. Процессы очистки вод и извлечения полезных компонентов .....  | 322 |
| 5.6.2. Системы замкнутого водооборота горно-металлургических<br>предприятий.....                               | 332 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 336 |

## ВВЕДЕНИЕ

В России настоящее и, по-видимому, отдаленное будущее связано с эксплуатацией недр, которые представляют собой важнейшую часть национального природного богатства и во многом определяют стратегию общественного развития. Стратегия общественного развития может принять формы устойчивого благополучия или вынужденного поиска условий выживания. Соответственно, и горная промышленность примет формы, отвечающие той или иной стратегии развития нашей страны. Современная идеология науки и производства в области горного дела должна исходить из положения, что недра Земли не могут быть сведены лишь к тем полезным ископаемым, которые необходимы в настоящее время. Однако сегодня недра определяют все первичные условия жизни общества, и ни одна фундаментальная общественная потребность не может быть удовлетворена в конечном счете, прямо или косвенно, без эксплуатации ресурсов недр.

Эксплуатация и сохранение недр связаны общей геологической основой, а также технологически, экономически, экологически и др. Нарушение этой связи неизбежно приводит в процессе эксплуатации к снижению ценности участков недр в георесурсном отношении, а зачастую и к исключению их из хозяйственного обращения. Кроме того, это становится источником весьма дорогостоящих, повседневных, экологических и других проблем.

Человек связан с недрами огромным количеством жизненно важных для него связей. Недра предоставляют ему условия существования в таком разнообразии, которое выходит далеко за пределы, традиционные для горного дела – добычу и переработку конкретных полезных ископаемых. Необходимые для человека свойства недр за этими пределами – тоже георесурсы. Если они не являются непосредственными объектами эксплуатации в данное время, то они не должны быть испорчены или потеряны для общества при освоении недр в других целях.

Известно, что масштабы и интенсивность эксплуатации недр возрастают. При этом расширяются и наши знания о возможностях, которые могут предоставить недра для человека, и граничных для этого условиях. Чтобы в полном объеме представить действительный потенциал недр и направления деятельности по его эффективному использованию и достаточному воспроизводству, необходимо сегодня переосмыслить предмет, содержание и цели горных наук, а также знать современные проблемы науки и производства в области горного дела.

Учебное пособие написано на основе фундаментального научного труда коллектива ведущих ученых России в области горного дела «Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли», изданного в 1997 году под редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого.

# **1. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ НАУК. ПРЕДМЕТ, СОДЕРЖАНИЕ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ**

## **1.1. Состояние горного дела в современной России**

Произошедшие изменения в научном мировоззрении нашли отражение прежде всего в гуманизации знаний и утверждении принципа системности в их развитии. Это вызывает необходимость обратиться к горным наукам с современных позиций, рассмотреть их предмет, содержание и новые задачи.

В первую очередь необходимо отметить, что существенно изменились природные условия горного производства. Во второй половине XX века человечество столкнулось с качественно новыми глобальными и весьма острыми проблемами в горных работах, обусловленными динамическими и газодинамическими явлениями в форме горных ударов, внезапных выбросов угля, породы и газа, техногенных землетрясений. Для горнодобывающей промышленности все большее значение приобретают увеличение глубины, на которой производится добыча полезных ископаемых, усложнение природных условий вновь осваиваемых месторождений и главное – снижение качества минерального сырья в недрах (обеднение полезными компонентами, повышение содержания вредных примесей, увеличение доли труднообогатимых полезных ископаемых в добыче минерального сырья и его переработке).

Появились и новые обстоятельства, ранее не принимавшиеся во внимание, такие как условия мирового рынка минерально-сырьевых товаров и требования обеспечения экологической безопасности горного производства.

Ухудшаются экономико-географические условия промышленного освоения месторождений и экологическая обстановка, особенно в крупных горнопромышленных регионах. Эта тенденция сохранится и в будущем. Недр становятся менее доступны в сравнении с водной или воздушной средами и даже ближним космосом. И ныне уровень развития цивилизации определяется теми возможностями, какие использует общество для безопасного и экономически эффективного освоения недр.

Человеческая деятельность, направленная на преобразование Земли, стала соизмерима по масштабам и последствиям с геологическими процессами. Вполне очевидно, что без учета проблематики освоения недр невозможно решить проблемы устойчивого общественного развития.

Потребности России в минеральном сырье практически по всем полезным ископаемым всегда удовлетворялись за счет соответствующего развития отечественной горнодобывающей промышленности, прогресс которой обеспечивался горными науками. Эта взаимосвязь выражалась до недавнего времени в тесной сопряженности минерально-сырьевого комплекса и системы научно-исследовательских учреждений горного профиля различной ведомственной подчиненности и научных подразделений вузов, охватывающей всю проблематику горного производства с учетом территориального размещения промышленности. Гор-

ные науки получали импульсы и поддержку для своего развития в горной промышленности; там же находили практическое применение многие научные достижения.

Задачи развития минерально-сырьевого комплекса и горнодобывающей промышленности были и остаются центральными для горных наук. Однако их решение невозможно без рационального использования в долгосрочной перспективе всех природных ресурсов. Это поможет не только удовлетворить текущие экономические потребности, но и создать нормальные условия для жизнедеятельности общества.

Сегодня особенно важно использовать все многообразие геологических ресурсов: размещать отвалы пустой породы в карьерном пространстве; применять закладку из отходов горного и металлургического производства при подземной разработке полезных ископаемых; извлекать полезные ископаемые с помощью скважинных физико-технических и физико-химических геотехнологий, но без разрушения и перемещения больших породных масс; создавать подземные захоронения высокорadioактивных отходов в особых массивах горных пород и т.д. Немалое значение имеет и решение экологических проблем за счет утилизации нетрадиционных георесурсов: подземных полостей (естественных и искусственных), термальных вод, техногенных месторождений, а также специфических свойств горных массивов (геомеханических, петрографических, фильтрационных и др.).

С незапамятных времен накопление и обобщение знаний в области горного дела, а по сути становление горных наук, было столь тесно связано с непосредственным, повседневным развитием всей производственной деятельности общества, что создавало, да и до настоящего времени создает впечатление их не фундаментального, а только прикладного характера по сравнению с другими науками. Более того, исключительная трудоемкость горного производства, его особое социально-экономическое положение в отдельные периоды трансформировали горные науки, уводя от наук о Земле, например, в сторону решения экономических и машиностроительных проблем, где они приобретали прикладной смысл. Хотя само по себе насыщение горных наук смежными знаниями является непреложным фактором их развития, они были и остаются науками о Земле, подобно геологическим наукам, имеющим вместе с ними единый «предмет труда» – месторождения полезных ископаемых, рациональное использование которых является условием существования человеческой цивилизации.

Академик Н.В. Мельников так формулировал цель горной науки: «Создать наиболее совершенные технические средства и технологические способы и приемы для достижения наиболее безопасной и экономичной разработки полезных ископаемых при всемерном облегчении труда шахтеров» и отмечал: «Предметом горной науки считаются процессы разработки полезных ископаемых в их развитии и взаимосвязи с сопутствующими им природными явлениями, т.е. с условиями фактического осуществления этих процессов» Исходя из этого под горной наукой понималась: «Совокупность знаний:

а) о природных условиях залегания месторождений полезных ископаемых и физических явлениях, происходящих в толще горных пород в связи с проведением выработок;

б) о технологических способах добычи и обогащения полезных ископаемых;

в) об организации производства, обеспечивающей безопасную экономичную разработку месторождений».

Выдвинутая в конце 60-х годов прошлого столетия Н.В. Мельниковым идея комплексного освоения недр как новое прогрессивное направление в области горных наук и горного производства обусловила их дальнейшее развитие.

В последнее два десятилетия наблюдается дальнейшее расширение целевой направленности проникновения человека в глубь земных недр. Это происходит в связи с расширением областей его деятельности – от разработки месторождений полезных ископаемых до освоения всех ресурсов недр (глубинных источников пресных, минеральных и термальных вод; внутренних – глубинного тепла недр Земли; природных и созданных человеком полостей в земных недрах). Это обусловило эволюцию горных наук, прежде всего на пути нахождения особого предмета (объекта) исследований – недр Земли, преобразуемых под непрерывным и нарастающим техногенным воздействием.

На этом пути учеными-горняками в ряде областей знаний были получены научные результаты, выдвинувшие отечественные горные науки в целом на передовые позиции. Важнейшим достижением горных наук за прошедший период следует считать создание научной базы обеспечения потребности общества в минеральном сырье за счет собственных ресурсов страны, что позволяло реализовать политические цели государства в области безопасности, экономического и социального развития.

Горные науки претерпевали эволюцию соответственно возрастанию сложности, масштабности проблем, возникающих перед горнодобывающей промышленностью, усилению их системного характера, появлению новых обстоятельств в общем экономическом и социальном контексте. Наиболее радикальные изменения произошли в горных науках в связи с введением и практическим использованием понятия «комплексное освоение недр». Не вполне раскрытое в свое время содержание этого понятия трактовалось, судя по смыслу высказываний, как одно из основных направлений научно-технического прогресса, обеспечивающих значительное повышение экономической эффективности горного производства и укрепление его минерально-сырьевой базы.

Академик М.И. Агошков существенно развил понятие и идею комплексного освоения недр. В его работах дана группировка ресурсов недр, включающая твердые, жидкие и газообразные полезные ископаемые, находящиеся в природном и техногенном измененном состоянии; энергетические ресурсы (в частности, геотермальное тепло); подземные полости (естественные и искусственные). При этом комплексное освоение недр рассматривалось с учетом двух его признаков –

полное использование осваиваемых ресурсов земных недр и сочетание применяемых в процессе освоения различных способов – и связывалось с существованием необходимой базы и соблюдением определенного неперемного условия. Необходимая база – развитие системы научно-технических знаний преимущественно в области горных, геологических и экономических наук, а неперемное условие (цель) – «достижение оптимального народнохозяйственного и социального эффекта от промышленного освоения ресурсов земных недр».

Оценивая сегодня значение понимаемой таким образом концепции комплексного освоения недр, следует признать, что она составляет, по сути, во многом новую идеологию горных наук, ориентирующую на вывод горной промышленности из порочного круга экстенсивного экономического роста, приводящего в конечном счете к ускоряющемуся и губительному ресурсопотреблению как средству саморазвития и самообеспечения. Становление понятия, идей и практики комплексного освоения недр вовлекло в сферу внимания ученых новые крупные научные проблемы, решение которых создавало благоприятные предпосылки для повышения эффективности производства путем его интенсификации и сокращения расхода различных ресурсов на единицу получаемого минерального сырья, обеспечивающего развитие страны за счет собственных возможностей.

Отличительной чертой современного этапа развития горнодобывающей промышленности является наличие для нее ограничений практически по всем важнейшим производственным ресурсам.

На пути к этому состоянию промышленность с каждым новым этапом включала в число несвободных, дефицитных по наличию и качеству, новые категории производственных ресурсов. Так, до 50-х годов прошлого века страна в целом и горное производство в частности испытывали ограничения по материально-техническим и финансовым ресурсам. К 60-м годам в числе дефицитных оказались и некоторые виды минеральных высококачественных ресурсов, что вызвало, в частности, дополнительную потребность в добыче железных руд, требующих обогащения, соответственно возникла необходимость в строительстве крупных горно-обогатительных комбинатов. В 70-х годах экономия трудовых ресурсов приобрела значение государственной стратегии. С конца 80-х годов в дополнение к дефицитности названных ресурсов быстрыми темпами нарастают ограничения по топливу и энергии, а с 90-х годов вызывают общественную тревогу экологические условия в большинстве горнопромышленных регионов. В связи с этим необходимо отметить, что ограниченность производственных ресурсов проявляется весьма сложно и не может быть в каждый момент времени абсолютной, одновременной и повсеместной. Ограниченность по каждому из производственных ресурсов обусловлена положением дел с обеспеченностью другими ресурсами и рядом иных обстоятельств. В частности, для многих видов минерального сырья имеет важное значение не общая величина разведанных запасов, а величина запасов, подготовленных к освоению, которая зависит, в свою

очередь, от технической оснащенности производства, имеющихся инвестиционных возможностей, горно-технических условий эксплуатации месторождения, достаточности выделенной территории для размещения всех необходимых производственных объектов, конъюнктуры на рынке, условий сбыта продукции и многого другого. Поэтому ограниченность производственных ресурсов отмечается для каждого из них в целом как усиливающаяся со временем тенденция, реальность которой не может вызывать сомнений у специалистов.

Появление нового ограничения по условиям экологии сопряжено уже не только с традиционными экономическими показателями производства, но и с сохранением здоровья населения и природной основы жизнедеятельности в целом. Экологические ограничения соотносятся с возможностями и условиями уязвимости жизни как таковой и по этой причине имеют по сравнению с другими ограничениями очевидный приоритет и тем самым определяют значимость всех иных условий. Вместе с тем, экологические ограничения стали реально обозначать пределы обеспечения общества минеральным сырьем, накладываемые современным техническим уровнем горной промышленности.

Иными словами, общей тенденцией является расширение круга дефицитных производственных ресурсов с практически полным исчерпанием возможностей для ресурсной взаимозаменяемости, необходимой для технического прогресса горной промышленности при существующем технологическом укладе (развитии по сложившимся тенденциям). Окружающая природная среда в горнопромышленных регионах в силу исчерпания ее ассимиляционных способностей вносит в развитие промышленности дополнительные ограничения и поэтому сама приобретает качество особого производственного ресурса. Все это означает для общества наступление предела эффективной реализации существующей концепции технического развития в сфере получения и потребления минерального сырья и появление необходимости выработки новой концепции, открывающей дополнительные ресурсные возможности в сложившихся условиях их ограниченности.

## **1.2. Современная идеология горных наук в России**

Такая концепция может быть обоснована новым подходом к недрам Земли, с чем связано дальнейшее развитие идеи комплексного их освоения. Настало время рассматривать недра Земли уже не только как источник минерального сырья, воды, газов, тепла с точки зрения их изъятия и утилизации, но в принципиально новом плане – как природный целостный многофункциональный ресурс жизнеобеспечения общества, находящийся в процессе постоянного преобразования. Использование ресурсов недр должно сейчас и в будущем предполагать управление состоянием недр и их функциональным назначением в этот или иной момент времени, имеющее целью сохранить недра в интересах дальнейшего устойчивого общественного развития.

Решение этой двуединой задачи – использование недр и их сохранение как видоизменяемого ресурса жизнеобеспечения общества – составляет современное идейное содержание комплексного освоения недр и одновременно современную идеологию горных наук.

В таком понимании комплексного освоения недр состоит очередной этап развития горных наук.

Каков же должен быть принцип реализации идеологии горных наук? Как уже отмечалось, общество подошло к той границе в освоении недр, когда их использование, понимаемое только как изъятие ресурсов Земли, реально угрожает в силу экосистемного взаимодействия недр с другими компонентами биосферы существованию природного базиса жизни. Здесь следует обратиться к известному высказыванию академика В.И. Вернадского: «...жизнь является... не внешним, случайным явлением на земной поверхности. Она теснейшим образом связана со строением земной коры, входит в ее механизм и в этом механизме исполняет величайшей важности функции, без которых он не мог бы существовать». В какой бы степени недра не были освоены (исчерпаны), общество не может существовать без них, т.е. быть в состоянии, когда их использование невозможно. Поэтому недра как особый многообразный ресурс должны быть сохраняемы постоянно.

Охрана недр Земли, изменяемых в своем состоянии и общественном назначении, может быть осуществлена только посредством постоянного целенаправленного их воссоздания в новом полезном качестве. Поскольку недра при освоении проявляют системное взаимодействие с биосферой, их сохранение при комплексном освоении предполагает воссоздание как земных ресурсов, так и устойчивого состояния экосистем на территории освоения.

С проблемой воссоздания ресурсов недр связываются понятия «ресурсовоспроизводящие технологии» и «ресурсовоспроизводящие функции» горного производства. Первое из них представляет собой прямые воздействия или дополнительные технологические процессы, при применении которых наряду с использованием тех или иных ресурсов недр производятся целенаправленные изменения условий залегания, агрегатного состояния и качества геогенных и техногенных образований, создающие новые виды ресурсов либо переводящие потенциальные ресурсы в реальные. Отсюда формируются новые ресурсовоспроизводящие функции горного производства, такие как изменение условий расположения образований, рассматриваемых в качестве ресурсов Земли; изменение их качества; изменение параметров, сроков формирования и состояния подземного пространства (минеральной среды или полостей).

Ресурсовоспроизводящие функции заключаются в целенаправленном воздействии на физические свойства минеральных сред и напряженное состояние горных массивов, а также в использовании протекающих при освоении недр процессов и состоявшихся изменений для решения разнообразных задач их сохранения (последующего перспективного освоения).

Сохранение недр при комплексном освоении раскрывается в достаточно простом принципе действий – на любом этапе использования тех или иных земных ресурсов вести дело так, чтобы не закрыть, а напротив, – открыть путь к освоению иных ресурсов для новых общественных потребностей. Например, добыча полезных ископаемых должна позволять проводить геологоразведку глубоких горизонтов месторождения из подземных выработок, а некоторые из них после реконструкции должны быть использованы в качестве вместилища производственных объектов (складов, хранилищ отходов, цехов перерабатывающего комплекса и т.д.), а также для создания производства по утилизации тепла Земли или забору воды для теплообеспечения развивающейся производственной и социальной инфраструктуры и т.п.

Реализация ресурсовоспроизводящих функций горного производства требует придания многоцелевого характера каждому очередному этапу освоения недр (например, разработке месторождений полезных ископаемых) с изменением соответствующих ему производственных и технологических комплексов, процессов и технических средств.

В связи с этим следует отметить, что активно развиваемое перспективное научное направление в составе комплексного освоения недр – освоение подземного пространства – традиционно понимается лишь как использование природных и техногенных полостей. Сохранение же недр подразумевает под освоением подземного пространства процесс управления состоянием недр и изменения их функционального назначения в границах определенного участка литосферы.

Особо важная роль в свете указанного отводится переработке полезных ископаемых и, соответственно, горно-обогатительной науке. Если традиционно на стадии переработки, в частности, твердого минерального сырья все внимание направлено на рациональное повышение извлечения и качества товарных продуктов, то в аспекте сохранения недр такое управление переработкой оказывается недостаточным. Отходы переработки должны рассматриваться уже как новые ресурсы для сохранения недр в целях их последующего использования (в качестве закладки подземных пустот, для регулирования фильтрационных, компрессионных и иных свойств горных пород на определенных участках литосферы; для создания техногенных ресурсов обедненного по тому или иному полезному компоненту минерального сырья). Поэтому управление отходами предполагает придание им необходимого качества по многим параметрам: объемным, вещественным, механическим, физико-химическим, санитарно-гигиеническим, экологическим и другим – в зависимости от технологии освоения и сохранения недр.

Из этого следует, что стадия переработки и соответственно обогатительный цикл горных наук ответственны за решение двух взаимосвязанных проблем – получение товарных продуктов для удовлетворения общественного спроса на них, с одной стороны, и производство новых ресурсов в указанном смысле – с другой.

Переходя к оценке экологической составляющей горных наук и соответственно комплексного освоения недр, следует исходить из того, что любой горный объект в процессе строительства и последующей эксплуатации неизбежно изымает из экосистемы данной территории природные ресурсы или изменяет их исходное качество (сокращаются площади пашен, лугов и лесов и ухудшается их качество; изменяется уровень грунтовых и подземных вод, а в ряде случаев – микроклимат; снижается продуктивность и уменьшается разнообразие флоры и фауны; повышается тектоническая и сейсмическая активность территорий). Денежные компенсации изъятия или качественного изменения природных ресурсов, как и платежи, и различные штрафы, не могут восстановить исходную систему в прежнем виде.

Накапливающиеся со временем экологические последствия, в ряде случаев усиливающие друг друга, как правило, переходят границы ассимиляционных возможностей природной среды и ведут к развитию опасных тенденций ее деградации. Поэтому в системе комплексного освоения недр речь должна идти о сохранении и целенаправленном преобразовании исходной экосистемы в другую, удовлетворяющую живущее на этой территории население с точки зрения качества окружающей среды.

Направления такой природоохранной деятельности могут быть следующими. Это может быть изменение способов разработки, технологии, технических средств и видов деятельности с ограниченным потреблением дефицитных в данном регионе природных ресурсов и сопряженное с этим изменение свойств и условий нахождения полезных ископаемых в литосфере и на поверхности; перемещение хранилищ отходов, а также производственных цехов, служб и некоторых сооружений в подземное пространство; формирование экологически сбалансированного антропогенного ландшафта; целенаправленный подбор соответственно специфике горного производства видов трав, кустарников и лесных насаждений в составе рекультивационных работ с учетом агротехнических свойств отвальных пород; создание заповедников и заказников; увеличение продуктивности и разнообразия флоры и фауны и т.д.

Таким образом, принцип природоохранной деятельности, направленной на обеспечение экологической безопасности, должен состоять в восстановлении по мере освоения ресурсов недр в регионе нормативного (требуемого) качества окружающей природной среды в целом путем сохранения или целенаправленного изменения структуры и состава исходной и формирования видоизмененной, сбалансированной, устойчиво функционирующей экосистемы. Хозяйственная деятельность по освоению недр должна в таком случае рассматриваться как экологически безопасная по отношению к данной экосистеме и проживающему здесь населению только в том случае, если известны и могут быть реализованы необходимые для соблюдения данного принципа условия.

Сохранение недр при комплексном освоении, когда они рассматриваются как часть биосферы, – это осуществление целенаправленных действий по вос-

созданию как недр в их измененном состоянии и направлении использования, так и экосистем в требуемом для обеспечения жизнедеятельности качестве окружающей среды.

### 1.3. Новая классификация горных наук

На современном этапе предметом горных наук являются недра Земли как видоизменяемый комплексный многофункциональный ресурс жизнедеятельности общества, а сами горные науки представляют собой систему знаний, включающую закономерности и методы освоения и сохранения недр Земли.

В связи с этим цель современных горных наук – получение новых знаний, обеспечивающих возможность управления состоянием и изменением функционального назначения недр при комплексном и экологически безопасном их освоении и сохранении как ресурса жизнеобеспечения для устойчивого общественного развития.

Современная эволюция горных наук изменила их место в системе наук о Земле. Совершенствование способов разработки месторождений полезных ископаемых шло в прошедшие десятилетия по пути углубления и расширения знаний применительно именно к объекту познания. Так, со временем само понятие «система разработки» трансформировалось в совокупность основных и вспомогательных технологических процессов.

Для современных горных наук характерен целый ряд признаков. Прежде всего это существование особого предмета (объекта) исследования – техногенно изменяемых недр Земли. Данная особенность выражается во временном режиме преобразования недр, когда их состояние, в отличие от геологических процессов, радикально изменяется на протяжении жизни одного поколения людей.

Для горных наук характерна специфика исследуемых ими явлений: крупный масштаб событий, обусловленных созданием и одновременным функционированием большого числа производственных объектов в условиях невозобновляемости запасов полезных ископаемых; значительная пространственная изменчивость свойств среды при освоении недр (твердой, жидкой и газообразной) в пределах влияния этих объектов на природу; вероятностный характер параметров, системная обусловленность и информационная емкость технологических процессов; сопряженность при освоении недр всех форм движения материи – от простой механической до высшей социальной, что выдвигает в число рассматриваемых объектов наиболее сложные природно-технические системы и систему человек – машина.

Такое многообразие факторов обуславливает использование в горных науках большого числа методов исследований: натуральных наблюдений, лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, теоретических обобщений, графоаналитических, сейсмоакустических методов, статистических оценок, аналогий, физического, математического и экономико-математического моделиро-

вания и других. При этом широкое распространение получают теории принятия решений, системного анализа и автоматизированного проектирования, а также теории гео- и горно-информационных автоматизированных систем с картографическими интерфейсами, имитационных моделей производственных объектов, различных видов мониторинга, систем прибор–ЭВМ.

Горные науки, как и другие естественные науки, имеют насыщенную событиями эмпирическую предысторию, развитый понятийный аппарат, верификацию (повторяемость результатов). В то же время горные науки несут на себе отчетливый феноменологический отпечаток. В них отсутствует некая единая изначальная аксиоматика и система базовых универсальных соотношений. Генетически они восходят к повседневной практике горного дела, которое может существовать лишь в технологическом единстве предмета труда (ресурсов недр), средств труда (технических средств) и субъекта труда (трудящихся). Поэтому беспредметен вопрос об изначальном приоритете какого-либо одного компонента.

Феноменологическая основа горных наук обуславливает их междисциплинарность. Поэтому для систематизации горных наук необходимо не только воспринимать их в ряду естественных наук, но и рассматривать в рамках глобальной системности и всеобщей взаимосвязи, что определяется новым для горняков понятием – «геосистема». Оно будет выражать всю совокупность природных и искусственно созданных объектов, несущих в себе свойства системы, создаваемой и используемой в целях освоения недр. Необходимо признать, что современной основой управляемого преобразования недр служит единство четырех компонентов: недр (многообразных георесурсов), техники и технологии, социально-экономического компонента и системной организации производственной деятельности. Единственный принцип, который может быть положен в основу систематизации горных наук, – это построение системы наук, соответствующее логике последовательности процессов освоения и сохранения недр.

Таким образом, современное естественно-научное содержание и методология горных наук раскрываются как система знаний о закономерностях и способах комплексного и экологически безопасного освоения и сохранения недр на основе постоянного технологического воспроизведения их ресурсов и нового функционального назначения.

Изменение концепции горных наук – от обоснования технических решений при разработке месторождений полезных ископаемых к выявлению закономерностей развития геосистем, установлению их параметров и методов управления функционированием в связи с последствиями освоения недр для природы и общества – позволяет по-новому представить классификацию горных наук применительно к освоению и сохранению недр при добыче твердых полезных ископаемых (таблица).

## Новая классификация горных наук

| №<br>п/п | Группа горных наук             | Горная наука  |
|----------|--------------------------------|---|
| 1        | Горное недроведение            | Горнопромышленная геология<br>Геометрия и квалиметрия недр<br>Геомеханика<br>Разрушение горных пород<br>Рудничная аэрогазодинамика<br>Горная теплофизика  |
| 2        | Горная системология            | Теория проектирования освоения недр<br>Экономика освоения георесурсов<br>Горная экология<br>Горная информатика  |
| 3        | Геотехнология                  | Физико-техническая геотехнология<br>Физико-химическая геотехнология<br>Строительная геотехнология<br>Геотехника   |
| 4        | Обогащение полезных ископаемых | Технологическая минералогия<br>Дезинтеграция и подготовка минерального сырья к обогащению<br>Физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов<br>Физические и химические процессы извлечения полезных компонентов из природных и техногенных вод |

Горные науки, которые объединены в группу «Горное недроведение», включают исследования свойств пород, горных массивов, георесурсов и недр в целом как средоточия различных природных и искусственно создаваемых образований, находящихся во взаимосвязи друг с другом. Исследование осуществляется с учетом изменения свойств георесурсов (разнообразия аномалий, масштабов и интенсивности их проявлений, пространственной локализации, сочетания, агрегатного состояния, экономических параметров и др.) под действием техногенных преобразований.

Научные дисциплины этой группы объединены общей идеей – выявить закономерности техногенной эволюции недр. Тогда можно будет судить о базе георесурсов для промышленности, получить представление о состоянии недр и оценить степень комплексности их освоения, сохранения и динамики возможных целенаправленных воздействий.

Горная системология включает в себя науки, которые изучают закономерности развития, геосистем и выявляют последствия освоения недр для общества и природы.

Геотехнология объединяет науки об извлечении полезных ископаемых из недр и водоемов, предметом исследований которых являются технологические процессы, технические средства, технологии, способы и горные объекты, позволяющие извлечь георесурсы из недр. Они же создают научные предпосылки для использования георесурсов тех видов, утилизация которых не предполагает их извлечения (например, подземные полости). Объединяющая идея – выявить научные предпосылки для технических решений, расширяющих функциональные возможности горных предприятий в преобразовании недр в целом. Теоретической основой могут стать положения о ресурсовоспроизводящих технологиях горного производства. Знания, полученные в этой области, должны содействовать комплексному использованию пород, горных массивов, георесурсов и недр и изменению их функционального назначения.

В группу «Обогащение полезных ископаемых» входят науки об извлечении ценных компонентов из минерального сырья. Предмет этих наук – изучение основных закономерностей физических, физико-химических и химических процессов разделения и концентрации минералов природного и техногенного происхождения, взаимосвязи структурного, вещественного и фазового состава минерального сырья с его технологическими свойствами. Установленные закономерности – основа технологий и технических средств для извлечения из земных недр ценных компонентов и превращения в продукты, пригодные для последующего использования в различных хозяйственных отраслях.

Взаимосвязь горных наук со смежными научными дисциплинами многогранна. Как науки междисциплинарные, горные науки связаны с обширным кругом различных отраслей знания. Наибольшее взаимодействие горные науки имеют с науками геологическими, геофизическими и геохимическими, черпают из них новые знания о строении и формировании земной коры, эволюции геодинамических процессов, физико-химических закономерностях образования минералов, горных пород и коры Земли. В более широком смысле речь идет об исследовании географических и геохимических основ образования месторождений полезных ископаемых.

В горном недроведении знания многих разделов математики и механики применяются при решении задач по оконтуриванию горных объектов (месторождений, их участков, сооружений, различного рода аномалий в массивах пород), геомеханики, разрушения горных пород, рудничной аэрогазодинамики, горной теплофизики. Сложность решения этих задач, как и других, например задач горной экологии, состоит в их большой размерности и нелинейном характере изменения параметров. Она в значительной мере преодолевается при использовании современных методов как вычислительной математики (в сочетании с компьютерными технологиями), так и математической статистики.

В геотехнологии следует активно использовать научные достижения математики и физики для решения вопросов деформирования горных пород в различных физических полях – механических, тепловых, радиационных, комбини-

рованных, взаимодействия разрушаемых и разрушенных горных пород с горными машинами и горными сооружениями. На развитой физико-химической основе построена геотехнология, предполагающая извлечение георесурсов из недр через скважины с предварительным выщелачиванием полезных компонентов, их расплавлением или изменением свойств горного массива путем его упрочнения цементацией, смолоинъекцией, замораживанием и другими способами.

Без использования различных разделов физики и химии невозможна разработка важнейших научных проблем обогащения полезных ископаемых. Разделение и концентрация минералов, направленное изменение их свойств и агрегатного состояния предполагает изучение физических, физико-химических и химических, гравитационных, магнитных, электрических, радиационных, ультразвуковых, электрохимических, механических, плазменных и других процессов, протекающих в минеральных средах.

Законы массопереноса, теория разделения, а также закономерности физико-химической механики – общие для всех обогатительных процессов.

При переработке полезных ископаемых с субмикрозернистым срастанием минералов целесообразно комбинирование гидро- и пирометаллургических процессов. А это предполагает использование горняками-обогащателями научных достижений в области металлургии.

Горные науки в группах «Геотехнология» и «Обогащение полезных ископаемых» немыслимы без применения разнообразной новой горной, транспортной и обогатительной техники. Решение проблем машиностроения, автоматизации, энергетики, управления производственными процессами имеет большое значение для развития этих наук.

Не менее важны для горных наук учет экономических знаний, использование их при освоении недр. В горном недроведении это сопряжено с изучением георесурсов как фактора общественного развития (при оценке источников георесурсов, например месторождений полезных ископаемых, их отдельных качественных характеристик и георесурсного потенциала в целом).

В горной системологии экономические знания необходимы ученым для подсчета георесурсов как системообразующего горного фактора в производстве, оптимизации структуры, параметров функционирования, пространственного размещения и организации взаимодействия геосистем различного уровня.

Аналогичную по значимости роль в развитии горных наук играет горная экология. Практические результаты научных исследований здесь в большей или меньшей степени воздействуют на окружающую природную среду. Экологическая оценка различных аспектов этого воздействия, учет многообразия георесурсов, масштабов и технологических особенностей освоения, а также возможностей сохранения недр составляют основное содержание взаимодействия горных наук и геоэкологии.

Геосистемы по всем признакам относятся к категории сложных. В связи с этим в горных науках активно используются общенаучные подходы, бази-

рующиеся на системном анализе и современных информационных технологиях. При этом наибольшее применение находит разработка банков данных и баз знаний в различных предметных областях, автоматизированного проектирования и гибридных, в том числе имитационных многоуровневых моделей.

В горном производстве особое место занимают социальные проблемы и факторы экологической безопасности. Весьма трудоемкое освоение недр требует привлечения значительных трудовых ресурсов. При этом труд горняков является тяжелым физически, опасным и не относится пока к числу наукоемких. В то же время обеспечение нынешнего и будущего общества минеральными ресурсами требует рассмотрения всех вопросов в контексте фундаментальной социальной проблемы – устойчивого общественного развития.

Взаимосвязь социальных факторов освоения недр дает представление о приоритетах, формирующих взаимодействие наук социального комплекса и горных наук. Все известные виды преобразования горного производства должны предполагать улучшение экологической ситуации. Это означает установление и соблюдение экологически безопасных параметров для всех элементов, подсистем и всей системы производства на всех иерархических уровнях и стадиях процесса комплексного освоения георесурсов и сохранения недр. Поэтому новая целевая ориентация горных наук открывает перед специалистами широкие возможности преобразования горного производства. Здесь необходим большой арсенал конкретных действий, но главным является создание новых функциональных и экономических структур, обеспечивающих, как отмечалось выше, достижение наивысшей эффективности преобразования (предпосылки к подобным радикальным изменениям, как известно, фактически уже закладываются).

При пользовании недрами должны быть в полной мере учтены два императива: социальный и экологический. Это обстоятельство для горных наук уже сейчас не формальный, не чисто технический момент. Оно требует кардинального повышения наукоемкости горного производства и создает предпосылки для гуманизации труда горняков и повышения общественного статуса и престижа деятельности по освоению недр.

Мерой наукоемкости для горного производства должна стать и степень осуществления разнообразных ресурсовоспроизводящих технологий воздействия на минеральную среду. Именно они призваны сейчас обеспечить рекультивацию недр в пространственных границах преобразуемого участка литосферы с учетом его свойств, требований и экологических нормативов. В этих технологиях должны быть использованы новые знания о свойствах природных и техногенных геосистем.

Необходим поиск радикальных решений, которые выводят горное производство на высший уровень совершенства. Наибольший рост его эффективности (с точки зрения социально-экономических и технических характеристик) ведет к созданию новых функциональных структур и появлению новых сфер применения.

Новая целевая ориентация горных наук открывает перед специалистами широкие возможности преобразования горного производства. Главное – создание новых функциональных и экономических структур, которые обеспечивали бы наивысшую эффективность преобразования. Особое значение имеет создание таких технологий, которые предполагают активное воздействие на горный массив с помощью физических, химических и других методов и направлены на изменение условий залегания, агрегатного состояния, качества природных и техногенных образований, создание или воссоздание полезных аномалий в свойствах минеральных сред.

В современных условиях важна разработка новой ресурсовоспроизводящей технологии производства угольных суспензий, гидродобычи металлических руд через скважины, складирования и хранения некондиционного минерального сырья.

При комплексном освоении недр необходимо использовать не только полезные ископаемые, но и ту часть сырья, которая именуется ныне отходами, а по сути является вторичными, не полностью использованными георесурсами. Спрос на последние пока невелик.

Изучение глубинных явлений и закономерностей необходимо для разделения минеральных комплексов и введения в практику горного дела технолого-минералогических оценок месторождений. Они позволяют создать эффективные технологии для первичной переработки руд сложного химического состава.

Эффективность добычи полезных ископаемых зависит от новых форм освоения недр. Так, их использование для размещения радиоактивных и токсичных отходов обеспечивает практически единственную возможность решения одной из наиболее острых экологических, социальных и экономических проблем. Необходимость создания подземных сооружений различного назначения также предполагает новые направления использования недр.

#### **1.4. Пути совершенствования горного производства и новые научные направления исследований**

Новые пути исследований и соответствующая их переориентация на сохранение недр Земли, комплексность и экологическая сбалансированность освоения всего многообразия георесурсов открывают широкие возможности для реализации наиболее прогрессивных идей по совершенствованию горного производства.

В отличие от прежних концепций новый подход к горным наукам предполагает:

- переход от взгляда на недра как на систему месторождений полезных ископаемых к интерпретации недр как средоточия генетически и пространственно взаимосвязанных разнообразных георесурсов;
- отказ от представления об исчерпаемости недр и осознание их как комплексного ресурса жизнедеятельности, связанного с развитием общественных

потребностей, с постоянно обновляемой возможностью использования его в новом качестве;

- отказ от понимания горных технологий лишь как средств по добыче и переработке полезных ископаемых и переход к представлению об их общих, ресурсовоспроизводящих функциях;

- переход от фрагментарного изучения горных объектов и процессов к установлению закономерностей взаимодействия различных природных и техногенных геосистем;

- переход от использования недр лишь для добычи и утилизации полезных ископаемых к сохранению недр в ходе их комплексного освоения (с воссозданием и увеличением разнообразия их полезных качеств);

- отказ в целом от технократической ориентации горных наук.

Значительно более широкое, чем известное ранее, содержание современных горных наук требует исследований в целом ряде новых научных направлений, среди которых важнейшими являются:

- создание научных основ оценки недр Земли как целостного природного ресурса жизнеобеспечения, важнейших параметров их состояния и характеристик качества земных ресурсов;

- разработка принципов, теории, методологии и новых методов проектирования и планирования экологически безопасного (сбалансированного) освоения недр Земли с целенаправленным воссозданием в новом функциональном назначении;

- изучение закономерностей формирования и осуществления ресурсовоспроизводящих функций горного производства, создание теоретической базы технологий и технических средств для изменения состояния недр, свойств минеральных сред и качества ресурсов Земли при комплексном экологически безопасном их освоении и сохранении;

- создание теории и методологии равновесного (экологически сбалансированного) природопользования при освоении недр;

- системный прогноз освоения ресурсов недр Земли и изменения их состояния

в связи с развитием общественных потребностей и технологического уклада экономики;

- разработка теории и методов мониторинга недр как комплексного ресурса с учетом техногенных изменений в их состоянии и различных направлений использования;

- развитие информационных технологий и создание автоматизированных средств поддержки решений в области освоения недр и их сохранения.

Новая идеология и классификация горных наук предполагают их описание, разработку структуры научных направлений, а также установление взаимосвязи между ними на основе существующей номенклатуры научных специальностей и учебных дисциплин.

С завершением этой работы будут созданы современные идейные и организационные предпосылки для становления нового мировоззрения в научных исследованиях по освоению недр, подготовке и аттестации горных специалистов, обеспечению георесурсами настоящего и будущих поколений. Все это утверждает горные науки в ряду наук о Земле и позволяет занять среди них подобающее место.

Таким образом, развитие за последние 30–50 лет представлений о горных науках, в котором можно выделить несколько этапов, означает восхождение знаний от понимания предназначения этих наук обеспечивать лишь требуемый уровень технико-экономического совершенства горной промышленности к осознанию их роли и функций в глобальном процессе сохранения недр, составляющих неотъемлемую часть биосферы.

### Список литературы к разделу 1

1. Недрa и основные положения экологической безопасности их освоения / *К.Н. Трубецкой [и др.]* // Горный журнал. – 1995. – № 7. – С. 17–21.
2. *Лаверов Н.П., Омеляненко Б.И., Величкин В.И.* Геологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. – 1994. – № 6. – С. 3–20.
3. *Агошков М.И.* Классификация горных наук // Актуальные проблемы освоения месторождений и использования минерального сырья / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1993. – С. 23–30.
4. *Ржевский В.В.* Горные науки. – М.: Недра, 1985.
5. *Агошков М.И.* Состояние и перспективы развития горных наук // Изв. АН СССР. Сер. Геология. – 1983. – № 5. – С. 26–34.
6. *Агошков М.И.* Развитие идей и практики комплексного освоения недр. – М.: ИПКОН АН СССР, 1982.
7. *Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Чаплыгин Н.Н.* Современные горные науки: предмет, содержание и новые задачи // Горный журнал. – 1994. – № 6. – С. 3–7.
8. *Ромашов А.Н., Цыганков С.С.* Современные горные науки и геодинамическая модель Земли // Горный журнал. – 1995. – № 6. – С. 3–4.
9. *Пучков Л.А.* О структуре горных наук. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 23 с.
10. *Певзнер М.Е.* О некоторых задачах горной науки на современном этапе ее развития // Горный журнал. – 1995. – № 8. – С. 3–4.
11. *Лаверов Н.П., Чернегов Ю.А.* Формирование прорывных направлений в горных технологиях с использованием современной методологии технического творчества // Горный журнал. – 1990. – № 12. – С. 3–8.

12. Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е. Основы ресурсовоспроизводящих технологий складирования и хранения некондиционного минерального сырья // Горный журнал. – 1995. – № 5. – С. 47–51.

13. Ямицков В.С. О формировании современных представлений и задач в горных науках // Горный журнал. – 1995. – № 9. – С. 3–5.

14. Засько Ю.Е. Стратегическое управление угольной отраслью. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 333 с.

15. Щадов М.И., Чернегов Ю.А., Чернегов Н.Ю. Методология инженерного творчества в минерально-сырьевом комплексе: в 2 т. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – Т. 1. – 238 с.; Т. 2. – 225 с.

16. Пучков Л.А., Аюров В.Д. Синергетика горно-технологических процессов. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 264 с.

## **2. ГОРНОЕ НЕДРОВЕДЕНИЕ**

Горное недроведение (горнопромышленная геология, геометрия и квалиметрия недр, геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика, горная теплофизика) включает исследования свойств пород, горных массивов, георесурсов и недр в целом как средоточения различных, находящихся во взаимосвязи друг с другом, природных и искусственно создаваемых образований. Их исследование осуществляется с точки зрения изменения свойств и качества георесурсов (разнообразия, пространственной локализации, агрегатного состояния, экономических и экологических параметров и др.) под действием техногенных преобразований.

### **2.1. Горнопромышленная геология**

#### **2.1.1. Основные положения горнопромышленной геологии**

История геологии, выделившейся в самостоятельную ветвь естествознания в конце XVIII века, начиналась с того, что накопленный в процессе добычи полезных ископаемых опытный материал подвергался синтезирующему осмыслению с целью теоретического обобщения и технического использования. Как фундаментальная естественно-научная дисциплина, геология пришла к нам, согласно высказыванию А.П. Карпинского, через горное дело. В зависимости от обращения к тем или иным элементам геологической среды – минералам и минеральным телам, породам, фаціальным и формационным комплексам, структурным этажам и геоструктурным единицам литосферы – возникали соответствующие области геологических наук: минералогия, петрология, историческая геология. В современной геологии, начавшей формироваться в первые годы XX века, отдельную группу составляют гидрогеология, инженерная геология, геокриология, что связано с повышением роли практических задач освоения недр: в первую очередь с развитием горного производства.

Развитие горного производства сопровождается увеличением глубины горных работ. Уже сейчас в России при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом свыше 30 карьеров имеют глубину более 150 м. Глубина некоторых шахт в ряде горнодобывающих районов превышает 1,5 км, железорудных карьеров, как правило, – 300 м; проектная глубина карьеров цветных металлов в основном 400–600 м. Проектная глубина угольных карьеров в Кузбассе и Экибастузе 300–600 м. В ближайшей перспективе около 70 % угольных и рудных карьеров будут иметь глубину от 150 до 500–700 м. В будущем, возможно, более 150 рудников с общей годовой добычей около 100 млн т станут разрабатывать месторождения на глубине от 500 до 1200–1300 м.

Соответственно усложняются гидрогеологические и инженерно-геологические условия эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а увеличение масштаба и глубины горных работ, глобальный характер горной инженерной деятельности определяют актуальность проблем динамики земной коры.

Разработка месторождений сопряжена с потерями минерального сырья в недрах и ценных компонентов при переработке добытых полезных ископаемых. Так, в процессе обогащения руд в настоящее время теряется более трети олова и около четверти железа, вольфрама, молибдена, оксида калия, переходящих в состав техногенных массивов.

К негативным последствиям освоения недр с позиций горнопромышленной геологии следует отнести структурные и вещественные изменения горных массивов не только в региональном, но и планетарном масштабе.

По имеющимся данным, на планете общее количество перемещенной из недр горной массы превышает 100 млрд т. Результатом такого воздействия является образование техногенных массивов – искусственно сформированных в природном ландшафте геологических тел, представленных горными породами, отходами обогащения, золами, шлаками, шламами.

К отрицательным и важным с геологической точки зрения последствиям их формирования необходимо также отнести изменение природного ландшафта, геофизических и геохимических полей в горных породах, слагающих основания техногенных массивов, а также гидрологических и гидрогеологических режимов районов расположения таких массивов; развитие эрозионных массивов.

Возникающие горно-геологические процессы могут иметь порой опасный, и даже катастрофический характер. С учетом требований практики горного дела в геологии создаются новые научные направления. Свидетельством этому является формирование новой отрасли геологических знаний – горнопромышленной геологии.

#### 2.1.2. Объект, предмет и задачи горнопромышленной геологии

***Горнопромышленная геология – это горная наука, представляющая собой совокупность знаний о процессах, протекающих в геологической среде при техногенном воздействии на недра, и закономерностях изменения при этом свойств георесурсов.***

Можно утверждать, что основой решения проблем горнодобывающей промышленности с учетом усложнения горно-геологических условий разработки и тенденции ухудшения качества полезных ископаемых является коренное улучшение геологического изучения недр и эффективное использование геологической информации в горно-технологических проектах и научных исследованиях.

Горнопромышленная геология как наука является базовой для исследований в области физических и химических процессов горного производства, геотехнологий и первичной переработки минерального сырья и включает три части: теоретическую, методическую и технологическую. Теоретической основой горнопромышленной геологии служит учение о горно-геологических объектах и факторах промышленного освоения месторождений полезных ископаемых. Методическая база – методы, средства и организация процессов изменения

и оценивания геологических показателей, характеризующих горно-геологические объекты, а также принципы и конкретные условия использования геологических данных для принятия обоснованных горно-технологических решений. В общенаучном аспекте горнопромышленная геология способствует формированию целостного представления о геологической среде в сфере горного производства. Народнохозяйственная значимость дисциплины связана с решением проблемы комплексного освоения и сохранения недр, с мероприятиями по сокращению территорий, нарушенных горными работами, поддержанию и восстановлению экологического равновесия.

**Предметом изучения горнопромышленной геологии являются:** геологические факторы и параметры (пространственно-морфологические, объемно-качественные, гидрогеологические и инженерно-геологические), определяющие возможность, целесообразность и условия промышленного освоения геологических объектов; состав и взаимосвязь показателей горно-геологических объектов разных уровней на различных стадиях развития горного производства; методы получения и оценки этих показателей; закономерности их преобразования в ходе горно-технологических процессов; методы, средства, структура и организация геологического обеспечения горного производства.

**Целью горнопромышленной геологии** является формирование научных геологических основ управления состоянием массива горных пород, запасами и качеством извлекаемых и используемых георесурсов на всех стадиях их освоения для повышения эффективности и безопасности горного производства, комплексного освоения и сохранения недр.

Достижения горнопромышленной геологии за последние 20–25 лет связаны с изучением следующих геологических факторов и параметров, определяющих целесообразность промышленного освоения геологических объектов:

- определение состава и взаимосвязи показателей горно-геологических объектов разных уровней на различных стадиях развития горного производства и методов получения и оценки этих показателей, а также закономерностей их преобразования в ходе горно-технологических процессов;
- разработка средств, структуры и организации геологического обеспечения горного производства.

**Главные задачи горнопромышленной геологии** в настоящее время состоят в геологическом обеспечении управления запасами и качеством полезных ископаемых, а также управления состоянием массива при горных работах.

**Основные научные направления горнопромышленной геологии:**

- изучение геологических и геолого-промышленных объектов;
- исследование влияния факторов промышленного освоения месторождений полезных ископаемых на их геологическое состояние;
- разработка методов и средств определения геологических показателей горно-геологических объектов, а также принципов использования геологических данных для обоснования горно-технологических решений;

- анализ и типизация горно-геологических показателей месторождений угля, горючих сланцев и торфа, рудно-минерального сырья, строительных горных пород, а также методов и организации геологического обеспечения добычи полезных ископаемых;

- гидрогеологическое и инженерно-геологическое обеспечение строительства горных предприятий и подземных сооружений;

- геоэкологическое обоснование природоохранных горных технологий;

- комплексные геологические исследования техногенных массивов (месторождений) хвостохранилищ и отвалов для обеспечения их экологической безопасности и получения дополнительных источников минерального сырья.

Горнопромышленная геология как новая научная область прикладной геологии и горного дела находится на стыке геологических и горных наук и широко использует научные разработки не только этих областей знаний, но и других фундаментальных наук – математики, физики, химии.

Горнопромышленная геология сегодня включает в себя:

- геологию углей, сланцев и торфа;

- геологию рудно-минерального сырья;

- геологию строительных горных пород;

- горнопромышленную гидрогеологию;

- горнопромышленную инженерную геологию;

- морскую горнопромышленную геологию.

**Геология углей, сланцев и торфа** разрабатывает методы и принципы геологического обеспечения разведки и эксплуатации месторождений каустобиолитов и предусматривает изучение вещественного состава полезного ископаемого, оценку запасов сырья, выявление локальных структур месторождения, анализ перспективности регионов на обнаружение промышленных месторождений, оценку значимости отдельных месторождений.

**Геология рудно-минерального сырья** занимается геологическим обеспечением разведки и разработки месторождений путем детального изучения факторов локализации руд, разработки локальных критериев прогноза и поисков новых рудных тел на действующих предприятиях, всесторонней оценки качества и количества этого сырья, контроля за эксплуатацией месторождений и комплексным использованием полезных ископаемых, обоснования выбора оптимальных схем разработки, опережающего технологического картирования типов руд при обогащении.

**Геология строительных горных пород** охватывает геологическое обеспечение разведки и добычи глин, песков, гальки, известняков, доломитов, декоративного и строительного камня на основе рационального комплекса поисковых критериев и эффективных способов разведки, изучения качественных параметров ископаемого и оценке запасов. Выполняется также геологическое обоснование рационального порядка отработки месторождений и разработка данных для перспективного планирования добычи, уровня производства и качества сырья.

**Горнопромышленная (шахтная и рудничная) гидрогеология** изучает влияние подземных вод на условия разработки месторождений полезных ископаемых с целью обоснования инженерных мероприятий по снижению воздействия подземных вод на горные предприятия и охране поверхностных и подземных водных объектов от истощения и загрязнения. К основным задачам гидрогеологического обеспечения горных работ относятся: установление общих закономерностей техногенного режима подземных вод при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий; изучение фильтрационных процессов, определение фильтрационных параметров и оценка условий питания водоносных горизонтов, дренируемых в ходе горных работ или подлежащих охране; прогноз водопритоков в горные выработки, обоснование направления дренажных мероприятий и определение параметров дренажных систем, контроль эффективности дренажных мероприятий; изучение и прогноз гидрогеомеханических процессов, развивающихся в обводненных массивах горных пород при ведении горных работ; прогноз и контроль загрязнения и истощения подземных вод, обоснование мероприятий по охране водных ресурсов геологической среды.

**Горнопромышленная инженерная геология** изучает горные породы, их толщи (массивы) и геологические процессы и явления, возникающие под влиянием горных работ.

Задачи инженерно-геологического обеспечения – установление физико-механических свойств горных пород в пределах рудных, шахтных и карьерных полей, а также отвалных массивов; инженерно-геологическая схематизация массивов горных пород и оценка их устойчивости и разрабатываемое обоснование горно-технологических решений по выбору схем вскрытия месторождений, определению параметров систем разработки в зависимости от типа горно-транспортного оборудования, регламентирование режима горных работ; прогноз и направленное изменение интенсивности инженерно-геологических процессов (литомониторинг) как основа природоохранных технологий.

Проблемы горнопромышленной гидрогеологии и горнопромышленной инженерной геологии комплексны, обусловлены необходимостью всестороннего изучения условий инженерного освоения и преобразования геологической среды. Предвидение характера и масштаба изменений природно-геологических условий и определение последствий для народного хозяйства необходимы для обоснования рационального проекта разработки месторождения, объемов работ по охране государственных земельного и водного фондов, рекультивации нарушенных горными работами территорий.

**Морская горнопромышленная геология** изучает вопросы, связанные с поиском, оценкой и эксплуатацией морских россыпных месторождений и месторождений, сложенных конкрециями твердых полезных ископаемых, которые расположены на дне океанов, морей и других крупных водоемов. Разрабатывает методы организации геологической разведки и эксплуатации подводных месторождений для геолого-экономической оценки и проектирования морских горных

предприятий, изучает вещественный состав и физические свойства рудных минералов. Проводит технологическое исследование песков и изучает среду, в которой работают горные машины и комплексы (динамику водной среды, рельеф и физическое состояние дна, вещественный состав и физико-механические свойства полезных ископаемых, расположенных на различных глубинах, влияние толщи воды на формирование и изменение свойств горной массы под воздействием морской и климатической обстановки). Изучает вопросы восстановления морских россыпей в процессе их разработки.

В зависимости от способов разработки и вида полезных ископаемых в рамках горнопромышленной геологии традиционно различают шахтную, рудничную, карьерную и приисковую отрасли геологии.

**Основной задачей шахтной геологии** является изучение на действующем угледобывающем предприятии всего комплекса геологических показателей, характеризующих полезные ископаемые, пласты угля с внутрипластовыми включениями и углевмещающие породы разреза угленосной толщи, строение отдельных шахтных полей и их участков, горно-динамические явления, газоносность, а также гидрогеологические и инженерно-геологические факторы. Она предусматривает детальное изучение условий формирования в процессе угледобычи потребительских свойств добываемой угольной массы (товарного или рядового угля); морфологии угольного пласта как объекта горного производства; структуры угольного пласта; вмещающих пород и шахтного поля, их трещиноватости, складчатой и разрывной нарушенности; горно-геологических параметров и физико-механических свойств угленосной толщи, пород кровли и почвы угольного пласта; экономической эффективности полноты извлечения запасов, комплексного (безотходного) использования добываемой горной массы; извлечения газов и прогноз газодинамических явлений.

**Рудничная геология** занимается всесторонним геологическим изучением эксплуатируемого месторождения и отдельных его частей и блоков для решения всех горно-геологических вопросов, связанных с технически правильной и целесообразной разработкой при наиболее полном и комплексном использовании полезного ископаемого и для продления срока работы горных предприятий за счет прироста дополнительных запасов.

**Карьерная геология** связана с изучением геологического строения, качества угля и горно-геологических условий разработки угольных месторождений открытым способом. Выделение специальной отрасли прикладной геологии обусловлено особенностями геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий залегания мощных пластов угля, системами их разработки, технологией и механизацией выемки, объемами и темпами горных работ. К числу особенностей этой отрасли относятся методики оценки и документации горно-геологических факторов, а также принципы составления горно-геологических характеристик месторождений и классификаций карьерных полей.

### 2.1.3. Перспективные научные задачи горнопромышленной геологии

Комплексные геологические исследования техногенных массивов хранилищ отходов рудообогащения с целью обоснования их последующего использования с обеспечением экологической безопасности. Получение необходимых результатов возможно при решении комплекса вопросов гидрогеомеханического, гидрохимического, инженерно-геологического, технологического и геолого-технологического характера.

До последнего времени отношение к хвостохранилищам как к своеобразным свалкам горного производства не позволяло (за редкими исключениями) проводить представительные исследования этих специфических объектов.

Прежде всего целесообразно осуществлять отдельный подход к геолого-промышленной оценке заполненных, формируемых и проектируемых хвостохранилищ исходя из реальных возможностей оперативного учета геологической информации при обосновании технологии разработки техногенных месторождений и переработки вторичного рудно-минерального сырья.

Хранилища отходов рудообогащения являются объектами повышенной экологической опасности из-за их негативного воздействия на воздушный бассейн, подземные и поверхностные воды, почвенный покров на обширных территориях. Наряду с этим хвостохранилища – малоизученные техногенные месторождения, использование которых позволит получить дополнительные источники рудно-минерального сырья при существенном уменьшении масштабов нарушения геологической среды в регионе. Ежегодно в мире в хранилища отходов рудообогащения черных и цветных металлов укладывают около 3 млрд м<sup>3</sup> хвостов, при этом только на укладку 1 млн м<sup>3</sup> хвостов требуется от 3 до 8 га земли. Мощность массивов отходов рудообогащения достигает десятков метров, а площади измеряются тысячами гектар. Общий объем отходов рудообогащения в хвостохранилищах лишь железорудных предприятия России составляет к началу XXI века около 1 млрд м<sup>3</sup>. Рост использования отходов рудообогащения сдерживается наличием в них главных и попутных компонентов, хотя и в незначительных концентрациях, но уже доступных для извлечения новейшими технологиями с определенным экономическим эффектом. Производство продукции из техногенных месторождений, как правило, в несколько раз дешевле, чем из специально добываемого для этого сырья, и характеризуется быстрой окупаемостью капиталовложений. Однако сложный химический, минералогический и гранулометрический состав хвостохранилищ, а также широкий набор содержащихся в них полезных ископаемых (от главных и попутных компонентов до простейших строительных материалов) затрудняют расчет суммарного экономического эффекта от их переработки и определяют, с одной стороны, индивидуальный подход к оценке каждого хвостохранилища, а с другой – создание методики геолого-промышленной оценки хвостохранилищ.

Хвостохранилище как горно-геологический объект представляет собой геотехническую систему, т.е. совокупность взаимодействующих природных и технологических элементов. Системный подход к исследованию хвостохранилища предусматривает его декомпозицию на ряд подсистем, состоящих из набора конкретных элементов. Состояние хвостохранилища как геотехногенной системы определяют группы элементов, относящиеся к физико-географической, минералого-геохимической, инженерно-геологической, гидрогеологической, технологической и экологической подсистемам.

Решение проблемы охраны подземных вод в горнодобывающих районах включает изучение и прогноз качества подземных вод, изменяющегося под влиянием хвостохранилищ и гидроотвалов. Здесь представляется целесообразным использование концепции контролируемого загрязнения подземных вод, в соответствии с которой гидрогеологические исследования должны включать:

- прогноз гидродинамического режима подземных вод под влиянием технических водоемов;
- определение фильтрационных свойств отложений, экранирующих ложе хвостохранилищ, для выявления граничных условий фильтрации и участков возможного поступления загрязненных вод;
- анализ гидрохимического режима подземных вод по району в целом и тенденций его изменения во времени;
- оценку условий и прогноз миграции загрязненных вод от хвостохранилищ на основе опытных работ, позволяющих оценить интенсивность массопереноса в подземных водах;
- разработку схемы рационального использования подземных вод с обоснованием режимной гидрогеологической сети, выполняющей контрольно-предупредительные функции и обеспечивающей повышенную достоверность оперативных прогнозов.

Вопросы оценки качества и использования техногенных месторождений как источников сырья для строительной промышленности достаточно детально разработаны. Вместе с тем, оценка хвостохранилищ как техногенных месторождений основных и попутных компонентов является весьма актуальной проблемой из-за сложности агрегатного состояния хвостов, нетрадиционности опробования и отсутствия экспресс-методов определения плотности, гранулометрического состава и содержания компонентов.

Геолого-промышленная оценка намывных массивов должна обеспечить получение данных для минералого-геохимического картирования, с помощью которого становится возможным установление влияния технологии формирования этих массивов на пространственно-временные изменения качественных показателей.

Для обоснования экологически безопасных технологий формирования хвостохранилищ и их последующего освоения в качестве техногенных месторождений необходимо:

– выполнить полевые и лабораторные эксперименты по определению водно-физических и механических свойств техногенных отложений и на основе полученных результатов – инженерно-геологическое районирование хвостохранилищ;

– обобщить гидрогеологическую информацию по объектам исследований и на этой основе сделать уточненный прогноз загрязнения подземных вод под влиянием хвостохранилищ;

– провести геолого-геохимические исследования отложений хвостохранилищ для выявления их зональности по вещественному составу;

– разработать методическую документацию по геотехнологической оценке и картированию техногенных месторождений;

– выполнить проектные решения по намыву хвостохранилищ, обеспечивающему управление их геолого-геохимической зональностью;

– подготовить инструктивно-методические документы по геоэкологическому мониторингу хвостохранилищ.

Таким образом, горнопромышленная геология – область знаний, которые связаны с изучением геологической среды. Возникновение этой области знаний относится к периоду качественных изменений горно-геологических условий освоения недр. Современный этап развития горнопромышленной геологии характеризуется особенно сложными условиями разработки природных и техногенных геологических объектов и эксплуатации горных сооружений.

Этот этап совпал с периодом резкого повышения технического и технологического уровней горного производства, основными чертами которого стало массовое использование комплексно-механизированных и автоматизированных систем и вычислительной техники.

В ближайшей перспективе получение новых горно-геологических знаний обусловлено ориентированием исследований на геологическое обеспечение комплексного освоения и сохранения недр. Это предполагает выявление в природных и формирование в техногенных геологических объектах новых полезных качеств, требуемых для обеспечения безопасности и экономической эффективности горного производства.

### **Список литературы к разделу 2.1**

1. Рудничная геология: учеб. пособие для вузов / В.Ф. Мягков [и др.]. – М.: Недра, 1986.

2. Ершов В.В. Основы горнопромышленной геологии. – М.: Недра, 1988.

3. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1989.

4. Ермолов В.А., Ларичев Л.Н., Мосейкин В.В. Геология. Ч. 1: Основы геологии: учеб. / под ред. проф. В.А. Ермолова. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 598 с.

5. *Свирский М.А., Чумаченко Н.М., Афонин Б.А.* Рудничная геология. – М.: Недра, 1987.

6. *Кирюков В.В., Очкур Н.П., Пожидаева М.Ф.* Шахтная геология: учеб. пособие для вузов. – Л.: Ленингр. горн. ин-т, 1985.

7. *Ермолов В.А.* Геология. Ч. 2: Разведка и геолого-промышленная оценка месторождений полезных ископаемых: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 392 с.

## 2.2. Геометрия и квалиметрия недр

### 2.2.1. История развития и современное состояние геометрии и квалиметрии недр

Геометрия недр исторически развивалась в рамках горных и геологических наук, выделяясь на первых этапах в виде отдельных положений. Наиболее полным печатным источником, в котором уже в XVI веке рассматриваются горно-геометрические вопросы, является энциклопедический труд «О горном деле и металлургии» Г. Агриколы. В книге описаны различные формы и пространственное положение рудных тел и пластов, общие закономерности распределения полезного ископаемого и локализации богатых руд.

Содержащиеся здесь понятия, характеризующие форму и элементы рудных тел (жила, шток, штокверк, висячий и лежащий бок, мощность, простирание, слияние и пересечение тел и т.п.), используются без изменения и в настоящее время. Г. Агрикола подробно рассматривал способы определения положения пластов и жил в пространстве с помощью существовавших в то время приборов и приспособлений (горный компас, ватерпас, угломер, рейки и др.).

У истоков отечественной геометрии недр стоял М.В. Ломоносов. Ему принадлежат первые высказывания и принципиальные для его времени положения о необходимости использования геометрии для познания недр: «...ныне настает употребить... к вящему, пространнейшему и яснейшему, сведению земного недр, приняв в помощь высокие науки, а особливо механику... и общую геометрию – правительницу всех мысленных изысканий». В работах «О слоях земных» и «Первые основания металлургии или рудных дел» он излагает способы геометрических построений, в том числе при проходке выработок на смещенную дизъюнктивом часть залежи.

В 1805 году в учебнике преподавателя Горного корпуса А.И. Максимовича «Практическая подземная геометрия» наряду с описанием подземных геодезических съемок даны решения некоторых задач, связанных с горной геометрией. Горно-геометрические задачи, обусловленные разрывными нарушениями, были описаны К.Ф. Бутеневым в работе «Новые правила для отыскания взброшенных и сдвинутых месторождений полезных минералов» (1835). Автор группирует характерные случаи взаимоотношения крыла и сместителя и рекомендует правила по заданию выработки на смещенное крыло.

В учебнике П.А. Олышева «Маркшейдерское искусство» (1847) подробно излагаются вопросы, смежные с геометрией недр и касающиеся графического изображения выработок и залежи на горизонтальных и вертикальных плоскостях. Обстоятельно рассмотрена задача оптимизации длины выработки, вскрывающей смещенную дизъюнктивную часть залежи.

Становлению геометрии недр как самостоятельного направления способствовали труды и производственная деятельность виднейших ученых-маркшейдеров проф. В.И. Баумана, проф. П.М. Леонтовского, проф. П.К. Соболевского. В 1905 году вышла в свет книга профессора Екатеринбургского горного училища П.М. Леонтовского «Элементы залегания пластов (горная геометрия)», в которой детально рассмотрены задачи, относящиеся к залеганию пластов и геометрии сочетания пласта и сместителя. При этом критически проанализированы представления зарубежных авторов о геометрии дизъюнктивов.

Профессор Санкт-Петербургского горного института В.И. Бауман в работе «К вопросу о сбросах, сдвигах и других смещениях жил и пластов» (Записки Горного института. 1907. Т. 1) привел строгое геометрическое обоснование номенклатуры дизъюнктивов и решения задач, связанных с разведкой смещенных частей жил и пластов. Его геометрическая классификация смещений до сих пор не утратила своего значения. Горный инженер И.А. Далинкевич, расширив материалы В.И. Баумана, издал курс лекций по вопросам горной геометрии, который читал студентам маркшейдерской специальности Горного института в 1923–1924 годах. Курс состоял из таких вопросов: горно-геометрические построения в проекции с числовыми отметками, плоскостные формы залегания, складчатые и разрывные нарушения, подсчет запасов. Этот круг вопросов определил начало составления нового горно-геометрического направления.

Интенсивное развитие горнодобывающей промышленности в конце 20-х и начале 30-х годов прошлого века обусловило необходимость иметь объективную и точную информацию о разведываемых и эксплуатируемых месторождениях, которая была бы удобной для инженерного использования и содержала количественную оценку характеристик месторождения и графическое их отображение. В связи с этим горно-геометрический анализ становится важным информационным обеспечением как на стадии разведки, так и на стадии промышленного освоения полезных ископаемых. В этот период профессором П.К. Соболевским были созданы теоретические основы и методология геометрии недр (первоначально чаще использовался термин «горная геометрия»).

Развитие геометрии недр до конца 30-х годов является начальным этапом ее становления как научного направления и оформления в учебную дисциплину, которая на постоянной основе преподается в высших горно-технических учебных заведениях.

Основным объектом изучения на данном этапе были форма и строение залежей полезного ископаемого, их залегание, складчатые и разрывные наруше-

ния. Методическую основу геометрии недр в это время определяют способы графического отображения геологических объектов и горных выработок с помощью различных видов проекций и объемных моделей. Признание получили методы геометризации посредством изолиний и математических действий над топоповерхностями, отображающими различные горно-геометрические показатели. Используются методы математической статистики и аналитической геометрии.

Геометризация осуществлялась на основе данных, полученных посредством маркшейдерской съемки, компасных и рулеточных замеров, с использованием простейших инклинометров (электролитических, магнитных) для съемки скважин, арифмометров для вычислений и механических приборов (пантографов, аффинографов) при графических построениях.

После 1945 года в значительной мере возрос объем исследований и число публикаций по геометризации конкретных месторождений. Эти работы показали, что геометризация весьма сложных рудных месторождений неэффективна, если не учитываются особенности геологического строения, локализации руд и процесса рудообразования. В результате потребовалась разработка методики геометризации применительно к геолого-генетическим типам месторождений, начиная от анализа и предварительной обработки исходных данных (замеров мощности, результатов опробования и др.) до горно-геометрической интерпретации с использованием аппарата математической статистики и построения комплекта графических материалов, в том числе в изолиниях. Все это дало возможность выявить закономерности распределения оруденения и на этой основе вести прогноз, целенаправленную разведку и выемку полезного ископаемого.

Для рудных месторождений особое значение имеет геометризация качества и физико-химических свойств горных пород и минерального сырья, что можно отнести к квалиметрии недр как составной части геометрии недр. Графоаналитическим путем удастся установить пространственное распределение содержания и создать своеобразную модель, определить взаимосвязь между компонентами.

При геометризации нефтяных залежей обычно строятся структурные карты и разрезы, создаются аналитические модели формы и свойств залежи, а также процессов, происходящих при откачке нефти, заводнении и т.д. Эти графоаналитические модели видоизменяются и корректируются в зависимости от стадии изучения и освоения месторождения с учетом современных представлений о генезисе нефти и геолого-структурных условиях ее скопления. Предваряет геометризацию оценка точности первичных измерений и наблюдений по скважинам (отметки горизонтов, результаты откачек, каротаж и т.д.), определение изменчивости, законов распределения показателей, корреляционных связей и т.д.

Стадийность геометризации определяется не столько объемом исходной информации, сколько требованиями к точности определения различных показате-

телей и характеристик. Степень детальности изучения и моделирования должна отвечать нормативным требованиям к точности определения площади залежи, нефтенасыщенности, количества запасов и т.д. По материалам геометризации решается вопрос о необходимости уточнения параметров залежи и проходки дополнительных скважин, а также составляется проект разработки и осуществления пробной предварительной эксплуатации. В условиях эксплуатируемых залежей главным критерием точности геометризации является достижение нормируемой точности нефтеотдачи или коэффициента извлечения.

Вероятностно-статистическая и геометрическая модель месторождения, которая создается в результате геометризации, отражает основные геолого-генетические закономерности и служит основой для продолжения изучения и дальнейшей разведки месторождения. Система разведочных выработок и проб соответствует геологическим закономерностям изменения мощности, качества на конкретный период изучения месторождения. Последующее определение местоположения пункта изучения геологических показателей и факторов осуществляется с учетом уже установленных предыдущей разведкой особенностей. В этом состоит суть прогнозно-динамического метода разведки по результатам геометризации. На этой основе удается осуществлять обоснованную и целенаправленную разведку без лишних и малоинформативных выработок.

Использование математических методов при обработке результатов разведки позволяет установить корреляционные связи между компонентами полезного ископаемого. Это дает возможность сократить число анализов и рационализировать процедуру опробования с учетом определения содержания легко анализируемого показателя. Практически реализация таких приемов описана во многих публикациях.

На основе геометризации изучаются природные процессы массо- и теплопереноса подземными водами. Изолиниями отображаются изменяющиеся в пространстве и времени уровни, напоры подземных вод, их химизм, температура и т.д. Пониманию природы гидрогеологических процессов способствуют построения гипсометрических карт водоупорных и водоносных горизонтов, карт изо мощностей, проницаемости и т.д.

Геометрия процесса и метод изолиний используются в решении вопросов теории рудогенеза при изучении потокообразного геохимического поля. При гидротермальном рудообразовании это поле представляется фильтрующей системой, по форме подобной колонне.

При изучении процесса сдвижения в случае подработки горного массива широко используются горно-геометрические методы. Это отображения изменений во времени и пространстве положения реперов и датчиков специальных наблюдательных станций, показателей напряженного состояния, проницаемости, структурных изменений массива. В изолиниях отображается форма мульды сдвижения, строятся графики как траекторий реперов в виде вертикальных профилей, так и графики различных деформаций.

Для изучения распределения горного давления и практического использования этих данных проводится геометризация гравитационного поля горного массива с учетом глубины залегания и объемной массы пород налегающей толщи. При влиянии на напряженное состояние тектонических движений их более изменчивый и локальный характер рационально отобразить горно-геометрическим способом. Поле тектонических напряжений воссоздается в изолиниях по достаточному количеству определений градиентов и направлений таких напряжений, получаемых методами разгрузки и геофизики. Результаты геометризации гравитационных и тектонических полей позволяют отобразить полное поле напряжений горного массива.

Геометризация геомеханических свойств проводится по результатам определения в различных пунктах месторождений соответствующих показателей. При этом часто используются корреляционные связи геомеханических показателей с различными факторами, особенно легко определяемыми при разведке и эксплуатации, например с глубиной залегания, минеральным составом пород, интенсивностью и анизотропией трещиноватости и т.д.

Математические действия с поверхностями топографического порядка, разработанные в геометрии недр, используются в геоморфологии для морфометрического анализа рельефа и в геодинамическом районировании горнопромышленных районов.

По результатам математического действия с топоповерхностями, в том числе с аппроксимационной топоповерхностью, полученной при тренд-анализе реального рельефа, даются характеристика остаточного рельефа, разности базисных поверхностей, устанавливается ранг основных форм рельефа и т.п. На этой основе составляется прогноз погребенных складчатых и разрывных структур, выделяются тектонические блоки и обосновываются геологоразведочные работы на нефть и газ, производится определение границ шахтных полей, способов их вскрытия и направления отработки работ.

Горно-геометрическая модель месторождения, представленная в виде комплекта чертежей, математического описания формы, строения, свойств и качества, а также статистических характеристик геологических показателей и их изменчивости является основой, достаточной и удобной для принятия проектных решений по строительству горнодобывающих предприятий, выбору системы разработки, средств механизации, технологии отработки, определению объема и качества добываемого сырья. Примером использования результатов геометризации является выбор места заложения шахтного ствола и подъема с учетом оптимизации грузопотока, изображаемого в изолиниях.

В решении задач проектирования открытой разработки широкое применение имеют планы изомощности внешней и внутренней вскрыши, планы изменения коэффициента вскрыши. Удобны для составления календарных графиков отработки месторождения планы линейных запасов полезного ископаемого, которые изолиниями отображают цифровую матрицу этого параметра. По планам изоглу-

бин и изомощностей планируется режим горных работ путем распределения объемов добычи и вскрыши при имитации экскаваторной отработки полезного ископаемого и вскрышных пород. Для анализа вариантов данная задача решается с помощью ЭВМ и специального моделирования режима ведения горных работ.

Современный научно-технический прогресс горнодобывающих отраслей, который характеризуется интенсификацией производственных процессов, применением высокопроизводительной техники, комплексным использованием недр и охраной природной среды, обуславливает необходимость полного и объективного информационного обеспечения инженерных решений и реализации мероприятий по эффективному изучению, разведке и промышленному освоению месторождений. В значительной мере данную проблему решает геометрия недр посредством горно-геометрического анализа и геометризации месторождений с широким использованием современных средств автоматизации вычислений и графических построений. Необходимость широкого использования ЭВМ обусловлена многовариантностью решаемых задач на основе учета комплексного влияния многих факторов, отличающихся большим диапазоном изменения их характеристик.

Центральное место в области автоматизации методов решения горно-геометрических задач занимает проблема создания цифровых моделей месторождений, обеспечивающих адекватное представление качественных и количественных характеристик разрабатываемых залежей полезных ископаемых.

Геометрическое описание и структура этих моделей являются исходными данными для информационно-вычислительных систем, обеспечивающих решение задач природопользования. По установившейся терминологии такие системы называют предметно ориентированными географическими информационными системами (ГИС), которые предполагают наличие:

- тематических баз данных (БД);
- графических БД;
- связи между тематическими и графическими БД;
- методов обработки, реализующих специфику области применения.

Для обеспечения эффективности создания требуемой ГИС необходимо использовать в качестве ядра системы стандартное программное обеспечение. Таким образом, наиболее предпочтительный порядок разработки ГИС выглядит следующим образом:

- 1) выбор наиболее подходящего программного продукта, который будет использоваться в качестве ядра разрабатываемой ГИС;
  - 2) описание структуры БД разрабатываемых залежей полезных ископаемых и создание тематических БД;
  - 3) разработка кодификатора;
  - 4) создание графической БД, описывающей геометрию месторождения.
- Наиболее предпочтительный вариант предполагает сканирование исходного материала и последующую векторизацию с использованием разработанного кодификатора;

- 5) создание географической БД путем установления связи между графическими объектами и объектами разрабатываемых залежей полезных ископаемых;
- б) использование разработанных методов решения горно-геометрических задач для включения их в разрабатываемую ГИС.

Важной проблемой геометризации является разработка методов точной и надежной пространственной аппроксимации изменчивости природных факторов путем построения интерполирующих поверхностей. В общем случае построение этих поверхностей должно выполняться по исходным геологическим данным, расположенным в узлах сети разведочных скважин. Универсальным решением является построение триангуляционной сети, по сторонам которой производится интерполяция геологических показателей.

Как известно, аппроксимация с помощью кусочно-непрерывных функций (сплайнов) является наиболее точным методом обработки геологических данных. Считается, что для программной реализации исследуемая поверхность должна разбиваться на подобласти геометрически правильной формы. При разработке проектов создания информационно-измерительных систем для горных предприятий был найден путь решения задачи аппроксимации изменчивости природных факторов с помощью сплайн-функций без разбивки на подобласти правильной формы, а непосредственно по фигурам триангуляционной сети. Это позволит увеличить точность и надежность решения различных горно-геометрических задач.

Необходимость автоматизации при горно-геометрическом анализе и геометризации обуславливает внедрение АСУ – САПР. Важную часть и первоначальную основу АСУ составляет информация о залежи полезного ископаемого в горном массиве, на основе которой решаются организационно-экономические и технические задачи. Поэтому эффективность этой системы в значительной степени определяется результатами геометризации, выполняемой на разных стадиях освоения месторождения. С учетом динамичности системы управления предложены принципы и структура автоматизированного планирования горных работ. При этом оптимизация всех видов планирования горных работ и управления качеством добываемого сырья осуществляется с использованием математической модели месторождения, являющейся продуктом геометризации.

Прямая задача геометризации и в настоящее время состоит в создании такой математико-геометрической модели, которая максимально объективно и полно отражала бы геометрический объект и важные для разведки и разработки показатели. С другой стороны, с помощью геометризации устанавливается оптимальное число пунктов изучения, выработок и проб, чтобы получить достаточный объем информации как для построения модели, так и для информационного обеспечения последующей разработки и разведки. Постоянной основой геометризации является геологическая информация, данные о геомеханических свойствах и процессах, о различных горно-геологических факторах, результатах координирования съемки горных и разведочных выработок. Базовую роль игра-

ют математические методы обработки и интерпретации результатов (математическая статистика, теория вероятностей случайных функций, информатика и др.).

В настоящее время продолжают исследования, связанные с оценкой изменчивости геологических показателей и методами их учета при горно-геометрическом моделировании, методами количественной оценки сложности горно-геологических условий разработки.

Разработана теория генезиса образования эндогенной и экзогенной трещиноватости, установлены закономерности проявления и количественно охарактеризованы парагенетические связи трещиноватости, развитой в угленосных отложениях. Эти научные положения послужили основой для рекомендаций по изучению и прогнозу дизъюнктивов и трещиноватости, определению размера зон ослабленных пород и целиков возле нарушений; предложены методы оценки общей нарушенности участка дизъюнктивами. Установлена экстремальная величина нарушенности угольных пластов, которая определяет целесообразность их разработки. Изучены закономерности локализации малоамплитудных нарушений, которые нельзя установить при разведке и которые значительно осложняют выемку угля механизированными комплексами. Предложены приемы реконструкции тектонических полей и связи между геометрическими параметрами трещиноватости, складок и дизъюнктивов. Установленные закономерности способствуют геометризации складок в свите пластов и решению обратной задачи – прогнозу трещиноватости по параметрам складки.

Продолжаются исследования влияния складчато-разрывных структур на закономерности процесса сдвижения подрабатываемого горного массива и деформации земной поверхности.

Современное состояние геометрии недр отличается значительным расширением области исследований в следующих направлениях:

- геометризация распределения показателей состава и свойств в недрах и управление объемом и качеством добываемого минерального сырья;
- управление запасами и полнотой извлечения, комплексное использование месторождения;
- математическая оценка и геометрическое отображение горно-геологических факторов, определяющих сложность условий разработки;
- первые опыты математического моделирования месторождения с целью планирования горных работ и режима добычи.

Сегодня геометрия недр решает актуальные проблемы горного дела и геологии на основе геометризации физических полей, природных и техногенных процессов, происходящих в массиве горных пород. Расширились методы геометризации при более широком использовании таких разделов математики, как тренд-анализ, кластерный, дискриминантный и факторный анализ, крайкинг и т.д. Значительные достижения связаны с использованием разных поколений и типов ЭВМ, алфавитно-цифровых печатающих устройств и графопостроителей.

ЭВМ широко используется:

- для количественной оценки достоверности и точности исходных данных, для выбора способов интерполяции и аппроксимации с соответствующим графическим отображением;
- при автоматическом вычерчивании горно-геометрических графиков, в том числе при построении изолиний;
- при аналитическом описании формы залежи и распределения различных показателей;
- при подсчете запасов;
- для математического (цифрового) моделирования месторождения с целью решения комплекса задач горного и разведочного дела.

Стали более совершенными средства и способы получения первичных данных за счет использования современных приборов (дальномеров, фототеодолитов и др.) при маркшейдерской съемке выработок и инклинометрии скважин; широкое применение имеют геофизические методы получения геологической и геомеханической информации, усовершенствованы способы и средства отбора проб, лабораторных испытаний и исследований.

Обзор исторического развития и современного состояния геометрии недр свидетельствует, что данная отрасль знаний является составной частью горных наук и полностью сформировалась в самостоятельную науку с конкретными задачами и целью, теоретической основой и методологией, сферой и объектами исследований и практического применения.

#### 2.2.2. Объекты изучения и перспективные задачи геометрии недр

*Геометрия недр* изучает пространственно-геометрические закономерности форм и залегания природных и техногенных геологических объектов, расположения горных сооружений, распределения в недрах свойств георесурсов и показателей их качества.

*Целью геометрии недр* является достоверное геометрическое отображение техногенного преобразования недр.

Практический смысл науки состоит в создании способов и технических средств решения геометрических задач управления в разведке георесурсов и горном деле.

*Объектами изучения геометрии недр являются:*

- форма, залегание и пространственное положение георесурсов, геологических тел и структур, трещиноватости горных пород;
- запасы и качество георесурсов, их расположение в недрах с оценкой промышленной значимости; распределение показателей качества и свойств георесурсов и свойств вмещающих пород;
- пространственное взаимное положение геологических и других природных объектов, техногенных геологических образований и объектов, а также разведочных и горно-эксплуатационных выработок и сооружений;

– пространственные и временные изменения параметров природно-геологических и техногенных процессов, происходящих в геологической среде.

Теоретически геометрия недр базируется на учении о геологическом, геохимическом, геомеханическом и других полях, характеризующих разные признаки и показатели (строение, свойства, состояние) горного массива и источников георесурсов, которые моделируются геометрически, в том числе с помощью поверхностей топографического порядка и разных видов проекций.

Геометризация является методической основой геометрии недр. Она включает в себя:

– сбор и комплектование исходной информации, получаемой при разведке, маркшейдерских съемках, опробовании, геофизических и специальных исследованиях;

– систематизацию, предварительную обработку и оценку точности информации с использованием вариационной статистики, теории случайных функций, конечных разностей;

– математическое и геометрическое моделирование и оценку точности модели;

– использование модели для решения задач разведки и промышленного освоения, а также проблем геолого-генетического характера.

**Основные перспективные задачи геометрии недр** состоят в следующем:

– информационное обеспечение горных и разведочных работ данными о форме залегания и нарушенности источников георесурсов и вмещающих пород, о распределении в недрах их состава и свойств, о количестве и качестве запасов, их изученности и промышленной пригодности, об изменчивости геологических и горно-геометрических показателей этих источников, о пространственных закономерностях техногенных образований;

– совершенствование методов и средств получения первичной горно-геометрической информации, ее обработки и геометрической интерпретации, особенно на базе современных приборов и средств автоматизации и ПЭВМ;

– создание научно-методического обоснования и программного обеспечения для геометрического отображения структуры источников георесурсов, показателей их свойств и качества;

– совершенствование методики горно-геометрического анализа и геометризации природных и техногенных процессов.

Геометрия недр в своих научных основах, методологии, объектах изучения, способах использования информации и практической реализации результатов, тесно связана со смежными науками: геологическими (тектоника и структурная геология, учение об образовании месторождений полезных ископаемых, гидрогеология и др.), геохимическими, геофизическими, горными (горнопромышленная геология, геомеханика, геотехнология, горная экология), математикой, инженерной графикой.

## Список литературы к разделу 2.2

1. *Борисенко З.Г.* Методика геометризации резервуаров и залежей нефти и газа. – М.: Недра, 1980.
2. *Боярский Э.Ф., Rogozov В.В.* Цифровое моделирование угольных пластов. – М.: Недра, 1992.
3. *Букринский В.А.* Геометрия недр: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002.
4. *Букринский В.А.* Геометризация недр. Практический курс: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004.
5. *Калинченко В.М.* Математическое моделирование и прогноз показателей месторождений. – М.: Недра, 1993.
6. *Кудряшов П.И., Кузьмин В.И.* Геометризация и учет запасов месторождений твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1981.
7. *Танайно А.С.* Автоматизация проектирования карьеров. Горно-геометрические расчеты. – Новосибирск: Наука, 1986.
8. *Трофимов А.А.* Основы горной геометрии. – М.: Изд-во МГУ, 1980.
9. *Ломоносов Г.Г.* Горная квалиметрия: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002.
10. *Кажиев Х.Х., Ломоносов Г.Г.* Рудничные системы управления качеством руд. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005.
11. *Попов В.Н., Букринский В.А.* Геодезия и маркшейдерия: учебник. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002.
12. *Левкин Ю.М.* Маркшейдерское обеспечение эксплуатации объектов в подземном технологическом пространстве. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003.

## 2.3. Геомеханика

### 2.3.1. Основные положения и история развития геомеханики

Деятельность человека по эксплуатации природных и техногенных месторождений полезных ископаемых, использованию выработанных пространств, застройке территорий, освоению и использованию других ресурсов недр и охране окружающей среды всегда осуществлялась в тесной взаимной связи на основе прогнозов изменения геомеханического состояния геологической среды под влиянием горных работ. При добыче полезных ископаемых еще в древние времена люди вынуждены были ограничивать размеры горных выработок и искусственно поддерживать их на отдельных участках, чтобы не происходили обрушения и завалы.

В процессе формирования горных наук геомеханика претерпела ряд изменений и неоднократно переходила из одной группы в другую, в зависимости от решаемых ею на определенном историческом этапе задач и используемых при

систематизации признаков. Долгое время задачи, решаемые с помощью положений горной геомеханики, относились к области знаний, называемой маркшейдерским искусством. Позже эта область знаний стала называться маркшейдерским делом или сокращенно маркшейдерией.

Становление геомеханики как науки началось с формирования и развития механики горных пород, которая входит в физику горных пород и процессов в качестве ее части. Механике горных пород, в отличие от классической механики, свойственны специфические методы и области применения, связанные с особенностями горных пород как объекта изучения.

При систематизации горных наук по признаку решаемых задач геомеханика подразделялась на управление горным давлением в целях безопасного и рационального извлечения полезного ископаемого и учет и оценку нарушений начального состояния объектов, расположенных выше горных работ, как в массиве, так и на земной поверхности. Сокращенно эти проблемы стали называться «горным давлением» и «сдвижением горных пород». По методам изучения геомеханических процессов геомеханика подразделяется на аналитическую и эмпирическую. На рубеже XIX и XX веков стали формироваться представления о горном давлении. Им предшествовали начатые во второй половине XIX века инструментальные наблюдения за сдвижением горных пород и оседанием дневной поверхности. Исходя из наблюдений за деформациями горных пород, раскрытием трещин и разрывами, горные инженеры во второй половине XIX века пришли к выводу о существовании «естественных напряжений» в горных массивах. В период 1878–1912 годов профессор Гейле высказал свои представления о напряжениях в горных массивах. Суть их состоит в том, что горизонтальные напряжения должны иметь величины того же порядка, что и вертикальные. В 1900 году в США на основе лабораторных экспериментов впервые была предложена формула для расчета прочностных показателей целиков в антрацитовых шахтах.

В 1907 году М.М. Протодяконов опубликовал работу «Давление горных пород на рудничную крепь». Эта работа и его гипотеза свода давления стали началом развития теории горного давления. Исходя из свода давления и обобщения данных по обрушениям в горных выработках, он вывел формулу для расчета давления пород на крепь и ввел понятие коэффициента крепости пород.

В первой половине 20-х годов прошлого столетия при строительстве Амстегского туннеля (Швейцария) впервые были проведены опытные работы по определению деформационных свойств скальных пород методом напорной камеры. По результатам наблюдений в процессе повышения давления и воды в камере были получены зависимости деформаций от нагрузки и определен модуль упругости породы в массиве.

В 1925–1926 годах А.Н. Динник впервые предложил использовать теорию упругости для описания напряженно-деформированного состояния горных массивов и сформулировал решение задачи теории упругости для тяжелого

полупространства в предположении равенства нулю горизонтальных деформаций. Отсюда появилось понятие исходного бокового давления, отличного от нуля, а отношение этого давления к вертикальному горному давлению получило название коэффициента исходного бокового давления. В то же время, в 1926 году, немецкий ученый Шмидт опубликовал работу, в которой связал исходные напряжения по Гейму с представлениями об упругих свойствах скальных пород.

Таким образом, в 20–30-х годах прошлого столетия впервые при решении проблем горного давления стали использоваться исходные понятия об упругих средах, закон Гука и уравнения равновесия. При этом заметим, что к этому времени уже была разработана теория упругости, которая наряду с сопротивлением материалов широко использовалась в мостостроении, машиностроении и других отраслях науки и техники.

В 30-е годы А.Н. Динник совместно с Г.Н. Савиным и А.Б. Моргаевским успешно развивают идею использования в горном деле методов решения задач теории упругости. Они впервые детально описали распределение напряжений вокруг горизонтальных выработок круглого, эллиптического и прямоугольного сечений в скальных породах.

В те же годы чилийский геолог Р. Феннер, как и А.Н. Динник, предложил считать горный массив линейно-упругим вне приконтурной зоны горной выработки. Ограничиваясь описанием напряженного состояния горных пород вокруг выработки круглого сечения, он выделяет зону пониженных напряжений с существенным смещением горных пород в выработку (зона Тромпетера), зону повышенных напряжений с разрывами породы и остальную часть массива, в котором с удалением от выработки ее влияние на напряженное состояние горных пород затухает. Р. Феннер обратил внимание на необходимость учета пластичности горных пород, неоднородности, слоистости, рельефа местности при изучении напряжений и смещений. В то же время Д.В. Филлинс экспериментально показал, что горные породы в зависимости от условий нагружения могут проявлять свойства ползучести, релаксации напряжений и пластичности.

В середине 30-х годов профессор Д.С. Ростовцев первым выдвинул гипотезу горного давления в очистных выработках, которая была положена в основу управления кровлей в лавах (Донбасс). Суть ее в том, что когда подработанная на больших площадях кровля висит, в краевых частях возникает опасная концентрация напряжений и может произойти обрушение основной кровли (вторичная осадка). При достаточно мощной непосредственной кровле и подбучивании ее вторичная осадка не оказывает существенного влияния на призабойную крепь. В 30-е же годы академик Л.Д. Шевяков предложил метод расчета целиков при камерно-столбовой системе разработки. Суть метода состоит в том, что на каждый целик давит вес столба пород до поверхности. Площадь сечения этого столба равна сумме площади самого целика и половины площади потолочин камер, примыкающих к целику. Такой подход к расчету целиков был достаточно

обоснован Г.Н. Кузнецовым и М.А. Слободовым применительно к пластовым месторождениям соли путем измерения напряжений методом разгрузки, который был предложен Д.Д. Головачевым в 1935 году для исследования строительных конструкций.

В конце 30-х годов С.Г. Авершин предложил способ расчета сдвижения земной поверхности на основе результатов натуральных измерений. Отметим, что наряду с началом развития натуральных инструментальных наблюдений, связанных с горным давлением и сдвижением горных пород, а также началом развития теории горного давления с использованием методов теории упругости и сопротивления материалов, были широко развернуты лабораторные исследования деформационно-прочностных свойств горных пород с учетом основного минералогического состава, степени метаморфизма, трещиноватости, влажности и выветриваемости.

В 40-е годы получили широкое развитие натурные наблюдения за сдвижением горных пород при разработке пологих, наклонных и крутопадающих пластов. В 1948 году были начаты исследования горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Основные положения метода моделирования были разработаны Г.Н. Кузнецовым. Позднее им была выдвинута гипотеза шарнирно-блочного механизма оседания основной кровли очистных выработок.

В этот же период для измерения деформаций и напряжений в натуральных условиях стали использоваться тензометрические датчики, в частности, при измерении деформаций на торце обуриваемого керна – динамометры, струнные датчики. Были разработаны первые геофоны для сейсмоакустической оценки нагруженного состояния горных пород.

Исходя из гипотезы консольных балок профессор В.Д. Слесарев предложил ряд формул для расчета предельных пролетов кровли на трех стадиях ее обнажения и формулы расчета давления на крепь очистного забоя. На первой стадии предельного пролета используется изгиб балки с «внецентральным» сжатием, свободно опертой или защемленной по концам, на второй стадии предельный пролет определяется максимумом прогиба балки без разрыва в нижней части, третье предельное состояние – трещина разрыва прорастает на всю толщину балки.

В отличие от гипотез Г.Н. Кузнецова и В.Д. Слесарева профессор П.М. Цимбаревич сформулировал гипотезу сдвига блоков или гипотезу сдвига призм обрушения слабых пород для очистных выработок на сравнительно небольшой глубине.

За рубежом в 1947–1951 годах бельгийский ученый А. Лабасс, следуя Р. Феннеру, сформулировал применительно к очистным выработкам свою гипотезу «предельного растрескивания». Согласно этой гипотезе, непосредственная и частично основная кровля при переходе из зоны опорного давления в зону разгрузки по мере перемещения забоя подвергается интенсивному растрескиванию, что связано с большой разницей между главными напряжениями. Он предлагает

использовать для поддержания кровли податливую крепь, но с весьма высоким сопротивлением, чтобы уменьшить расслоение непосредственной кровли. Голландский профессор Ф.К. Итерсон считает, что в забоях лавы происходит пластическое выдавливание горных пород из зоны опорного давления.

К этому времени относится основополагающая работа В.В. Соколовского «Плоское предельное равновесие горных пород». Эта и последующие работы В.В. Соколовского по механике сыпучих сред и теории пластичности сыграли весьма существенную роль при решении проблем устойчивости бортов и уступов. Используя эти работы, Г.Л. Фисенко в 70-х годах предложил ряд расчетных методов, которые стали широко использоваться при открытой разработке месторождений.

Значительное влияние на развитие аналитических методов в геомеханике применительно к горным проблемам оказали работы Д.И. Шермана, С.Г. Михлина, С.Г. Лехницкого. Схематизируя горные выработки эллиптическими и щелевыми вырезами, они дают точные решения поставленных задач, что позволяет провести детальный анализ полей напряжений в идеализированной постановке задачи. Д.И. Шерман разработал метод расчета напряжений около двух сближенных эллиптических выработок большой протяженности на достаточно большой глубине.

И.В. Родин и Г.Н. Савин положили начало использованию аналитических методов в решении задач о взаимодействии крепи с породами горной выработки кругового сечения. Крепь рассматривается как упругое кольцо, вставленное в круговой вырез. Из решения этой контактной задачи Г.Н. Савин получает расчетные формулы давления на крепь. Позднее этот вопрос с учетом упругопластических деформаций применительно к вертикальному стволу с крепью рассмотрел профессор Ф.А. Белаенко. В дальнейшем развитие этих методов с широким использованием в горной практике связано с именами многих ученых и в первую очередь с Н.С. Булычевым и Н.Н. Фотиевой.

Особое внимание привлекли труды С.Г. Лехницкого, наиболее полно и детально разработавшего теорию упругости анизотропного тела. Все слоистые горные массивы, по существу, являются анизотропными. На основании своих работ 1940 года С.Г. Лехницкий дает в 1950 году постановку и точное решение задачи о распределении напряжений и смещений в трансверсально-изотропном массиве вокруг вертикального ствола. Этим решением впервые было показано, что вертикальный компонент напряжений при проходке стволов не изменяется, т.е. остается равным по величине исходному вертикальному горному давлению.

В мире признано, что 50-е годы нашего столетия можно считать началом систематических исследований в области геомеханики, механики грунтов и инженерной геологии при постоянном развитии связей с физикой, механикой, химией. Это обусловлено, с одной стороны, переходом на новый уровень добычи полезных ископаемых, туннелестроения, строительства гидротехнических

и подземных сооружений, подземных взрывов, а с другой – катастрофами и крупными горно-технологическими проблемами, в основе которых лежат геомеханические процессы. К ним относятся внезапные выбросы угля, пород и газа в шахтах, горные удары, внезапные обрушения больших масс горных пород.

В исследования по геомеханике включились университеты, научно-исследовательские институты академий. Начиная с 50-х годов прошлого столетия многие исследования в горном деле, связанные с механикой горных пород, стали отличаться от всех предыдущих тем, что в них, наряду с решением конкретных горнотехнических проблем в области горного давления и сдвижения горных пород, изучаются природа и механизм явлений, порождаемых горными работами. В результате сформировались и получили развитие крупные научные направления. В этом отношении работы В.В. Соколовского, С.Г. Лехницкого, Д.И. Шермана, А.Н. Динника, Г.Н. Савина и других ученых нашей страны сыграли исключительно большую роль. Развитию новых направлений в значительной мере способствовали книги К.В. Руппенейта и Ю.М. Либермана «Введение в механику горных пород» (1960), Д. Талобра «Механика скальных пород» (1957), Г. Джегера «Механика горных пород и инженерные сооружения» (1972) и др.

Это привело к разработке математических и физических моделей трещиноватых и блочных горных пород, которые обладали упругими, вязкими, пластическими, фильтрационными свойствами. Создаются специальные модели разрушения горных пород, особое место занимают модели взрывного разрушения, которые широко используют понятие ударной волны в горных породах (М.А. Садовский, М.А. Лаврентьев, Н.В. Мельников, Г.И. Покровский, Г.П. Демидюк, Е.И. Шемякин, В.Н. Родионов и др.).

Вместе с созданием моделей горных пород и физико-математической постановкой задач геомеханики начали развиваться методы решения этих задач. Все это в совокупности обусловило разработку и развитие многих научных направлений геомеханики горного давления, взрывных волн и разрушения горных пород, сдвижения горных пород, устойчивости горных выработок, фильтрации в трещиновато-пористых горных породах, внезапных выбросов угля, пород и газа и др.

Методы математической теории упругости и пластичности начали систематически использоваться в геомеханике после опубликования работ С.А. Христиановича и С.В. Кузнецова (1955–1966), детально описавших на основе аналитических решений задач геомеханики закономерности перераспределения напряжений в массивах горных пород, формирование зон опорного давления, разгрузки, расслоения с учетом крепи и закладки при разработке пологих пластов. Методы механики деформируемых трещиновато-пористых сред, газовой динамики в сочетании с экспериментальными исследованиями поведения угля, пород и газа при высоких давлениях начали также систематически использоваться при изучении внезапных выбросов угля, пород и газа, закономерностей

газовыделения в горные выработки. В этом направлении важное значение имели работы С.А. Христиановича, В.В. Ходота, С.В. Кузнецова и др. Позднее в Германии теорию внезапных выбросов угля и газа, близкую по основным положениям к теории С.В. Кузнецова, развивал Р. Липпман.

В 60-х годах была разработана теория гидроразрыва горных пород (С.А. Христианович, Г.И. Баренблатт, Ю.П. Желтов), основанная на прорастании трещин, заполняемых жидкостью под давлением. В дальнейшем эта теория развивалась во многих странах, а результаты ее широко используются в нефтепромышленной механике и при измерениях напряжений в горных массивах.

Геомеханика существенно расширила круг своих задач и область исследования после того, как был разработан метод конечных элементов для расчетов на ЭВМ напряжений и деформаций в различных конструкциях.

Впоследствии практически все методы численного решения задач геомеханики, включая задачи разрушения, фильтрации, прорастания трещин, основаны на методе конечных элементов. В самих расчетах представилась возможность отразить неоднородность и блочность массивов, технологическую последовательность горных работ. Это позволило детально изучить все особенности перераспределения напряжений в горных массивах при сооружениях весьма ответственных объектов, сложных по своей конструкции и больших по объему. Благодаря этому методу расчета стало возможным осуществить геомеханический мониторинг.

С 70-х годов численные методы геомеханики стали широко использоваться при изучении горных ударов для раскрытия механизма этих явлений, определения условий их проявления. В США разрабатывается многоканальная микросейсмическая аппаратура для регистрации и определения местоположения источников акустической эмиссии и очагов разрушения в массивах горных пород в реальном времени. Эта аппаратура расширила возможность изучения напряженно-деформированного состояния горных пород около выработок и прогнозирования динамических проявлений горного давления.

Геомеханический мониторинг и математическое моделирование напряженного состояния и поведения горных пород определили новый подход к изучению деформационных и прочностных свойств горных пород и массивов. Изучаются деформационно-прочностные свойства при неравнокомпонентном трехосном сжатии, оценивается масштабный фактор для перехода от образцов к массивам, изучаются реологические свойства, оценивается влияние температурного фактора. Разработано много методов для определения проницаемости горных пород, нефтяных и угольных пластов. Новое продолжение получила диаграмма напряжение–деформация–пределное деформированное состояние горных пород, которая связана с жесткими условиями нагружения горных пород на уровне предельного сопротивления разрушению.

На всех этапах своего развития геомеханика получала мощные импульсы со стороны органов, контролирующих состояние безопасности горных работ

и жизнедеятельности населения. Подобного рода проблемы возникли еще в Средние века, когда, при добыче полезных ископаемых приходилось определять устойчивость пространств, образующихся в результате извлечения полезных ископаемых из недр, и вести горные работы с учетом близости ранее выработанных участков и горизонтов, под зданиями, сооружениями и водоемами, вблизи шахтных стволов и шурфов и т.д. Вначале многое решалось на основе передаваемого из поколения в поколение практического опыта рудокопов, предполагающего главным образом визуальные наблюдения за поведением горных пород и развитую интуицию. Однако со временем этого стало недостаточно.

В середине XIX века в Бельгии и Франции возникла острая полемика между горной инспекцией и рудничными инженерами, после того как во многих домах в районе горных работ в пригороде Льежа появились громадные трещины. Позднее, в 50-х годах того же столетия, подобная угрожающая ситуация сложилась и в некоторых горнопромышленных городах Германии. Для предотвращения конфликтов правительства разных стран были вынуждены издавать постановления, регламентирующие процессы извлечения полезных ископаемых из недр.

В нашей стране изучение сдвижения горных пород на плановой основе, как важный элемент управления горными работами, началось, практически только в 30-е годы прошлого столетия. Наблюдения вели на единой методической основе и с каждым годом их совершенствовались и расширялись. В настоящее время они проводятся почти во всех угольных и горнорудных бассейнах страны. По масштабам и полноте исследований, а также по ценности получаемых результатов наша страна занимает в этой области одно из первых мест в мире.

На основании проведенных исследований впервые в мире были составлены бассейновые Правила охраны сооружений, основанные не на эмпирических зависимостях, а на строгих инженерных методах расчета.

Обзор исторического развития и современного состояния геомеханики свидетельствует, что данная отрасль знаний является составной частью горных наук. Геомеханика полностью сформировалась в самостоятельную науку с конкретными задачами и целью, теоретической основой и методологией, сферой и объектами исследований и практического применения.

### 2.3.2. Объекты и задачи исследований геомеханики

**Геомеханика – это наука о деформациях горных пород, движениях в них жидкости и газа и силах, вызывающих эти деформации и движения.**

**Объектами геомеханики являются** горные массивы со всеми элементами геологического строения и нарушенности в недрах Земли на различных масштабных уровнях и собственно горные породы, составляющие эти массивы. Горная порода рассматривается как геологическое образование твердой деформируемой среды минерального состава с присущей ей плотностью, трещиноватостью и прочностью. Горный массив – участок земной коры в границах, уста-

навливаемых исходя из постановки научной (технологической) задачи или изучаемого процесса.

Деформационные, прочностные, волновые и фильтрационные свойства горного массива изучаются в совокупности с физико-механическими свойствами слагающих горных пород.

Геомеханика устанавливает законы формирования напряженно-деформированного состояния и разрушения горных пород, развития в них деформационных процессов, движения жидкостей и газов в горных массивах, образования блочных и складчатых структур, сохранения устойчивости горных выработок и откосов горных сооружений и земной поверхности.

**Основной задачей геомеханики является** изучение геомеханических процессов, происходящих в геологической среде под влиянием горных работ, и создание методов оценки, прогноза и контроля состояния толщи пород и поверхности Земли в различные периоды преобразования недр.

**Цель геомеханики** состоит в познании законов согласования горных объектов с природными телами земных недр при изменяющемся поведении тел в процессе комплексного освоения и сохранения недр.

**Под геомеханическим обеспечением** такого согласования понимается обоснование и выбор систем и порядка ведения горных работ, взаимного положения выработок, способов управления горным давлением, скорости продвижения забоев и других параметров технологических процессов, при которых деформации в толще горных пород и на земной поверхности будут находиться в заданных пределах.

Геомеханическое обеспечение необходимо на всех стадиях освоения недр: при проектировании, строительстве, эксплуатации, реконструкции и ликвидации объекта. От полноты и надежности используемых при проектировании сведений о геологическом строении и геомеханическом состоянии горного массива во многом зависят как будущая безопасность и эффективность работы горных предприятий, так и состояние окружающей среды.

Оценка геомеханического состояния породного массива до начала горных работ производится как в России, так и во всем мире на основании геологических данных и инженерных изысканий и уточняется по газо- и геодинамическим проявлениям по мере проведения горных выработок.

Прогноз изменения геомеханического состояния породного массива под влиянием горных работ производится по установленным закономерностям сдвига горных пород и земной поверхности и разработанным методам расчета деформации. С учетом степени обоснованности расчетных формул и способов их получения методы расчета подразделяются на теоретические, эмпирические и полуэмпирические.

Теоретические методы базируются преимущественно на уравнениях, используемых в механике сплошной среды, при этом массив горных пород принимается как упругая, пластичная, вязкая, сыпучая или другая идеализированная

среда, отличающаяся от реальной. Теоретические методы для инженерных расчетов применяются редко.

В практике горного дела используются в основном эмпирические и полуэмпирические методы расчета. Эмпирические методы базируются на зависимостях, полученных непосредственно из результатов инструментальных наблюдений в натуральных условиях, полуэмпирические – на зависимостях, установленных на основании обобщений, теоретических соображений, физических и математических аналогий. Численные значения коэффициентов в расчетных формулах полуэмпирических методов определяются по данным натуральных наблюдений.

Четкую грань между упомянутыми методами провести очень сложно, особенно для полуэмпирических методов, которые примыкают, с одной стороны, к эмпирическим, а с другой стороны, к теоретическим методам расчета. Одни полуэмпирические методы базируются преимущественно на логических соображениях, другие – на относительно строгих теоретических обоснованиях.

За рубежом получили распространение способы расчета, построенные главным образом на различных предположениях и аналогиях. Общим недостатком методов, применяемых за рубежом, является то, что они основаны на условных предположениях, не вытекают непосредственно из физической сущности процессов. Такими недостатками обладали долгое время и методы, применяемые в отечественной практике. Лишь в последние годы благодаря фундаментальным исследованиям ряда научно-исследовательских институтов горного профиля удалось выявить новые важные закономерности развития деформационных процессов в толще пород и установить четкие зависимости параметров этих процессов от основных влияющих факторов, которые делятся на заданные природные и регулируемые. Целенаправленное изменение регулируемых факторов позволяет управлять развитием деформационных процессов как в пространстве, т.е. в толще горных пород и на земной поверхности, так и во времени. На этом принципе строятся способы управления геомеханическим состоянием породного массива, научные основы которого впервые разработаны в нашей стране. В настоящее время установлен характер развития знакопеременных деформаций в породной толще и их влияние на образование водо- и газопроводящих трещин, зон повышенного горного давления и зон разгрузки и т.д.

По количеству высокоточных инструментальных наблюдений за развитием геомеханических процессов в различных горно-геологических условиях отечественная школа горных геомехаников значительно превзошла все школы мира. Наблюдения охватывают глубины от земной поверхности до 1200 м, углы падения от 0 до 90°, размеры выработанного пространства от единиц до тысячи метров и практически все встречающиеся в природе геомеханические и газодинамические состояния массива.

Контроль за изменением геомеханического состояния породного массива в процессе освоения недр производится путем проведения инструменталь-

ных наблюдений за деформациями горных пород и земной поверхности. Результаты инструментальных наблюдений используются для решения следующих задач:

- установление правомерности для рассматриваемых условий принятой при расчетах модели деформирования массива;
- определение правильности используемых при расчетах характеристик породного массива;
- уточнение закономерностей развития деформационных процессов и зависимостей его параметров от основных влияющих факторов;
- контроль за развитием деформаций земной поверхности и охраняемых объектов с целью своевременного принятия защитных мер по предотвращению или снижению вредных последствий горных разработок при приближении наблюдаемых деформаций к их допустимым или предельным значениям;
- установление эффективности принимаемых мер защиты;
- определение степени влияния горных работ при возмещении ущерба, нанесенного владельцу подработанного объекта.

Управление деформационными и фильтрационными процессами состоит в приведении к взаимному соответствию параметров и порядка ведения горных работ с геомеханическим и газодинамическим состоянием массива. Оно может осуществляться путем целенаправленного изменения факторов, оказывающих влияние на развитие деформационных и фильтрационных процессов, в том числе технологическими средствами: путем тампонажа трещин, создания в массиве разгрузочных щелей, компенсационных траншей и других специальных способов воздействия на толщу пород и земную поверхность. Исходные данные для управления деформационными процессами получают расчетом устойчивых размеров выработанного пространства, целиков, порядка безопасной выемки горной массы и других параметров ведения горных работ по допустимым деформациям породной толщи и земной поверхности. При расчетах используются те же методы, что и при прогнозе, только производятся они в обратном порядке, т.е. деформации считаются заданными, а параметры и порядок ведения горных работ – искомыми величинами.

Геомеханическое обеспечение комплексного освоения ресурсного потенциала недр необходимо в следующих случаях:

- при составлении проекта разработки месторождений полезных ископаемых в части выбора параметров и порядка ведения горных работ, взаимного положения выработок, организации геомониторинга и составления мероприятий по предотвращению или снижению вредных последствий горных выработок;
- эксплуатации горнодобывающих предприятий для корректировки выбранных параметров, порядка ведения горных работ и других положений проекта, а также для проведения наблюдений за развитием деформационных процессов и оперативного принятия мер по предотвращению вредных последствий этих процессов;

– ликвидации горнодобывающих предприятий для прогноза развития деформационных процессов после окончания горных работ и предотвращения образования на поверхности провалов, воронок и других проявлений неустойчивости массива, а также в части использования высвобождающихся горных выработок для народного хозяйства;

– сооружении и эксплуатации подземных объектов различного целевого назначения для оценки их длительной устойчивости и герметичности и прогноза последствий, которые могут возникнуть при нарушении их устойчивости и герметичности;

– застройке подрабатываемых территорий для выбора местоположения объектов строительства, последовательности застройки, определения величин ожидаемых деформаций, на которые следует рассчитывать конструкции сооружений;

– оценке изменения экологической обстановки в районах разработки месторождений полезных ископаемых и в районах строительства подземных объектов различного назначения, особенно подземных атомных электростанций, хранилищ радиоактивных и токсичных отходов.

В последние годы активно развиваются геодинамические разделы геомеханики, которые изучают, среди прочего, актуальные для горного дела движения и деформации земной коры на локальном уровне. Этому способствовало развитие новых представлений о блочном строении земной коры на разных масштабных уровнях, а также интерес, вызванный негативными последствиями техногенной деятельности человека, которая в отдельных случаях оказывает заметное влияние на естественные геодинамические процессы и производственную деятельность человека.

Природные тела как объекты геомеханики – результат структурирования горных массивов под действием гравитационных полей. Учет динамических структур необходим при проектировании, строительстве и эксплуатации долговременных инженерных сооружений, а также для получения достоверной оценки ожидаемых последствий воздействия антропогенных факторов на природные тела.

К конкретным проявлениям динамических структур, которые имеют отношение к горному производству, прежде всего относятся локальные напряжения, связанные с современным движением в земной коре, которые не всегда коррелируют с горным давлением. В отличие от статических, локальные напряжения динамических структур являются следствием современного движения горных масс и поэтому возобновляются даже после разовой разгрузки.

Другая важная особенность структур – наличие собственного масштаба. Устойчивость инженерного сооружения зависит от рационально выбранных соотношений размеров его конструктивных элементов и характеристических размеров динамической структуры массива.

Наконец, крупномасштабное сооружение само инициирует формирование новой динамической структуры, которая при определенных условиях может

привести к перестройке исходной природной структуры с далеко идущими и не прогнозируемыми последствиями. Вместе с тем ясно, что согласование строительных и эксплуатационных параметров инженерных объектов с динамическими структурами позволяет уже сегодня использовать энергию динамических структур в достижении необходимых технологических эффектов.

Новые данные о величине неотектонических движений в земной коре, об их существенной пространственной и временной неоднородности, а также сложной реакции массивов горных пород на внешние возмущения, в том числе в процессе освоения недр – требуют проведения более детальных исследований основных закономерностей дифференциальных движений естественных блоковых структур на разных иерархических уровнях.

Фактически в традиционной геодинамике, описывающей движение крупных структурных образований в мантии и земной коре на значительных временных интервалах, зародилось новое направление, связанное с изучением современных движений блоковых структур, составляющих земную кору на локальных (характерный размер народнохозяйственного объекта) масштабных уровнях, а также с прогнозом поведения сложноструктурированной геологической среды под воздействием техногенных и изменяющихся естественных факторов.

Возникшая в последнее время необходимость прогнозирования реакции массивов горных пород сложного строения в процессе освоения недр требует учета и более тщательного рассмотрения поведения блоковых структур во времени и пространстве. Прогноз долговременной устойчивости геологической среды с целью обеспечения безопасного освоения недр, а также возможности, открывающиеся при целенаправленном изменении напряженно-деформированного состояния в процессе ведения горных работ для повышения извлечения полезных ископаемых и снижения трудовых и материальных затрат, приводят к настоящей необходимости проведения детальных исследований реакции массивов горных пород конкретного строения на внешние воздействия.

Вопросы геомеханического обеспечения освоения и сохранения недр играют заметную роль в общей программе комплексной оценки ресурсного потенциала горно-промышленных районов и прогноза последствий его использования как на локальном и региональном, так и на планетарном уровнях. На локальном уровне изучение геомеханического состояния массива обеспечивает правильный выбор параметров объекта – осваиваемого георесурса – и надежную оценку последствий его влияния на окружающую среду в непосредственной близости. На региональном уровне решаются более масштабные задачи. В частности, при разработке комплексных месторождений полезных ископаемых на основе анализа геомеханического состояния массива выбираются такие параметры и порядок ведения горных работ, при которых отработка одних участков месторождения полезных ископаемых или другого источника георесурсов не будет препятствовать или существенно осложнять работу других. На этой же основе определяет-

ся также степень влияния горных работ на окружающую среду в регионе. Глобальное значение приобретают вопросы геомеханического обеспечения при отработке запасов полезных ископаемых на больших площадях. Неуправляемое движение огромных масс пород может активизировать геодинамические и тектонические процессы, привести к оседанию земной поверхности на многих тысячах квадратных километров и затоплению ее, что может вызвать изменение климата. Частые прорывы нефтепроводов на подрабатываемых территориях также приносят глобальный вред окружающей среде. Но особенно важно геомеханическое обеспечение освоения ресурсов недр при строительстве подземных атомных станций, хранилищ радиоактивных веществ и других подобных объектов.

### 2.3.3. Приоритетные и новые научные направления в геомеханике

**Приоритетные научные направления в геомеханике.** Работы по освоению ресурсов недр, в отличие от работ на земной поверхности, ведутся в сложной, слабо изученной, постоянно меняющейся и потенциально опасной среде, какой является массив горных пород. Поэтому эффективность использования недр, безопасность горных работ и степень их воздействия на окружающую среду во многом зависят от надежности оценки геомеханического и газодинамического состояний массива, правильности прогноза изменения этих состояний под влиянием горных работ, точности контроля деформационных и фильтрационных процессов, происходящих в толще пород и на земной поверхности, и оперативности принятия мер по предотвращению или снижению вредных последствий, вызываемых этими процессами.

Приоритетными направлениями исследований в области геомеханики традиционно продолжают оставаться:

- создание научных основ и практических способов управления геомеханическими процессами в толще горных пород при освоении и сохранении недр;
- разработка методологии изучения и прогноза развития деформационных процессов и явлений, возникающих в массиве горных пород в результате человеческой деятельности;
- развитие теории управления деформационными процессами, происходящими в толще горных пород и на земной поверхности;
- создание геомеханических основ формирования горных конструкций в земной коре и определения их рациональных параметров;
- изыскание эффективных методов и технических средств наблюдений и контроля за геомеханическим состоянием горного массива в местах ведения горных работ и зонах возможного проявления их воздействий на геологическую среду.

В области геодинамики регионального и локального масштаба приоритетные направления исследований включают:

– установление общих закономерностей поведения локальных участков земной коры с учетом энергетических и силовых связей во всей иерархической цепочке естественных структурных образований, в том числе: геодинамические процессы и явления в земной коре на локальном уровне, структурно-тектоническое и блочно-иерархическое строение локальных участков земной коры как характеристика механического состояния реальных массивов горных пород, количественные характеристики систем тектонических и привнесенных в процессе освоения недр сил, действующих в структурно неоднородной геологической среде, с целью прогнозирования поведения реальных горных массивов, банк данных по характеру, величине и местам проявления напряженного состояния горных массивов;

– изучение реакции различных участков земной коры на антропогенные воздействия при освоении недр, в том числе: анализ масштабов влияния техногенных воздействий на геодинамическое состояние отдельных структурных элементов земной коры, проведение инструментальных исследований и развитие наблюдательных сетей для регистрации деформационных процессов в осваиваемой части массивов горных пород, создание банка данных геодинамических проявлений техногенного происхождения, разработка методов прогнозирования долговременных последствий разработки и эксплуатации земных ресурсов с учетом геодинамических факторов.

***Новые научные направления в геомеханике.*** Из числа новых научных направлений в геомеханике выделяются следующие. Одно из них связано с проблемой охраны окружающей среды. Особенно ощутима острота этой проблемы в высокоразвитых горнодобывающих районах. Совместное влияние горных разработок и промышленных предприятий, связанных, как правило, с переработкой добываемого сырья, изменяет экологически обстановку в горнодобывающих районах. Чтобы не допустить необратимых процессов и сохранить, а возможно, и обогатить природу в этих условиях, необходимо разрабатывать и принимать действенные меры по недопущению или устранению вредных последствий, вызываемых инженерной деятельностью человека.

В ряде случаев горные выработки являются причиной не только деформаций зданий и сооружений, но и образования провалов, неожиданных интенсивных оседаний отдельных участков поверхности, невозможности хозяйственного использования территории, их подтопления, возникновения открытых трещин, глубоких мульд, уступов и т.д.

Опыт стран с развитой угледобывающей промышленностью и высокой плотностью застройки подрабатываемых площадей показывает, что при оценке последствий подработки в современных условиях акцент следует делать на характере и интенсивности повреждения поверхности земли. При оседании земной поверхности происходит сокращение площадей, пригодных для строительства и сельского хозяйства.

В связи с использованием значительных площадей плодородной земли в несельскохозяйственной сфере площадь сельскохозяйственных угодий во всем мире постоянно сокращается. Из-за быстро растущего уровня урбанизации в горнодобывающих районах все острее ощущается нехватка свободных площадей для промышленного и гражданского строительства. Поэтому новое строительство все чаще проектируется над старыми горными выработками, пройденными на малой глубине. Однако риск образования провалов поверхности на этих участках заставляет прибегать либо к переносу строительства на другое, часто невыгодное в отношении коммуникаций и транспортных связей место, либо производить дорогостоящее тампонирующее пустот в горных выработках. Перенос строительства, особенно крупного, в большинстве случаев невозможен.

Известно, что при подземной разработке месторождений полезных ископаемых в движение приходят огромные массивы горных пород, в десятки и сотни раз превышающие размеры выработанного пространства. При этом в толще горных пород образуются зоны повышенного горного давления и зоны разгрузки, обрушения и плавного прогиба пород, зоны сквозных и локальных трещин. Происходит неравномерное оседание земной поверхности, сопровождающееся появлением на ней зон растяжения и сжатия, а при больших деформациях – воронок и провалов, трещин, ступеней и уступов. Нарушается гидрогеологический режим подземных и грунтовых вод, происходит осушение или заболачивание больших территорий, что нередко приводит к изменению структуры экосистем, исчезновению отдельных видов флоры и фауны. В зданиях и сооружениях, попадающих в зону вредного влияния горных работ, возникают различные повреждения, усложняющие условия эксплуатации этих объектов и иногда приводящие к выходу их из строя. При наличии в регионе нескольких видов полезных ископаемых несогласованная их отработка может привести к порче и потерям ценного минерального сырья. В определенных условиях нарушение равновесия породного массива, вызванное проведением выработок, приводит к существенному ухудшению экологической ситуации в регионе, возникновению аварий на горных предприятиях и даже к развязыванию таких грозных явлений, как горные удары, крупные оползни, техногенные землетрясения, внезапные выбросы угля, породы и газа.

Для предотвращения вредных последствий горных работ требуется обосновать и создать инженерные методы оценки, прогноза и контроля геомеханического состояния породного массива, позволяющие своевременно определять ожидаемые последствия, обнаруживать предшествующие им признаки и оперативно реагировать на них. Необходимые предпосылки для решения этих задач созданы исследованиями деформационных процессов в толще горных пород и на земной поверхности, позволившие установить закономерности и параметры этих процессов. Указанные исследования позволили также выявить зависимости характера и параметров деформационных и газодинамических процессов от ос-

новых влияющих факторов, что создало предпосылки для управления этими процессами.

Другим новым приоритетным направлением в геомеханике является установление закономерностей, количественных зависимостей и характера протекания геомеханических процессов при знакопеременном, циклическом развитии деформаций.

Проведенные в последние годы исследования показали, что геомеханические процессы протекают циклично с развитием знакопеременных деформаций. Регулируя эти процессы, можно управлять развитием деформаций как в пространстве, так и по времени. При подработке водных объектов основное внимание необходимо обращать на предотвращение появления сквозных водопроводящих трещин, что достигается наложением деформаций сжатия на деформации растяжения. При дегазации выбросоопасных пластов, наоборот, следует стремиться к однозначному наложению деформаций с таким расчетом, чтобы в толще пород образовалось как можно больше газопроводящих трещин.

К новым приоритетным направлениям исследований следует отнести обоснования систем мониторинга в горнопромышленных регионах. В настоящее время наблюдения за изменением геомеханического состояния породного массива ведутся различными ведомствами, по разным методикам, с неодинаковой точностью и с другими различиями, при которых сопоставление результатов наблюдений, их обобщение и использование становится практически невозможным. Для решения этой проблемы необходимо обосновать и разработать единую методику проведения и организации мониторинга.

### Список литературы к разделу 2.3

1. Отечественная маркшейдерия и геомеханика. – М.: Недра, 1987.
2. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989.
3. Иофис М.А. Научные основы управления деформационными и дегазационными процессами при разработке полезных ископаемых. – М.: ИПКОН АН СССР, 1984.
4. Иофис М.А., Шмелев А.И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985.
5. Навитный А.М., Иофис М.А., Айруни А.Т. Опыт разработки угольных пластов под инженерными и природными объектами / ЦНИЭИуголь. – М., 1987.
6. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986.
7. Линьков А.М., Зубков В.В., Хеиб М.А. Метод решения трехмерных задач о пластовых выработках и геологических нарушениях // ФТПРПИ. – 1997. – № 4. – С. 3–25.

8. *Подильчук Ю.Н.* Пространственные задачи механики горных пород. – Киев: Наук. думка, 1983. – 160 с.
9. *Жданкин Н.А., Жданкина А.А.* Геомеханика горных выработок: Сопряжение лава–штрек. – Новосибирск: Наука, 1990. – 112 с.
10. *Журавков М.А.* Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах: курс лекций. – Минск: Изд-во Бел. гос. ун-та, 2002. – 456 с.
11. *Журавков М.А., Мартыненко М.Д.* Теоритические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных пород. – Минск: Изд-во Бел. гос. ун-та, 1995. – 255 с.
12. *Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А.* Деформирование соляных пород. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 204 с.
13. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
14. *Баклашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
15. Внезапные разрушения почвы и прорывы метана в выработки угольных шахт / *А.М. Морев [и др.]*. – М.: Недра, 1992. – 174 с.
16. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
17. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. – М.: Недра. – 1996. – 447 с.
18. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справ. пособие / *И.М. Петухов [и др.]*. – М.: Недра, 1992. – 256 с.
19. *Баклашов И.В.* Геомеханика: учеб. для вузов: в 2 т. // Основы геомеханики. Т. 1. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 208 с.
20. Геомеханика: учеб. для вузов: в 2 т. Геомеханические процессы. Т. 2. / *И.В. Баклашов [и др.]*. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 249 с.
21. *Казикаев Д.М.* Геомеханика подземной разработки руд: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 542 с.
22. *Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г.* Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / ООО «Недра–Бизнесцентр». – М.:, 2007. – 467 с.
23. *Киреев А.М., Войтенко В.С.* Управление проявлениями горного давления при строительстве нефтяных и газовых скважин. – Тюмень: Экспресс, 2006. – Т. 1–2.
24. *Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л.* Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.

## 2.4. Разрушение горных пород

### 2.4.1. Развитие научных знаний и практики в области разрушения горных пород

История сохранила для нас описание способов разрушения горных пород в различные периоды развития человечества. Использование физической человеческой силы и простейших орудий труда позволяло разрушать и отделять от массива в день не более десятков килограмм горной породы. Для увеличения эффективности горных работ использовались различные технические приемы разрушения горной породы. Один из них, сохранившийся до наших дней (Китай, добыча камня), это применение деревянных клиньев, вбиваемых в трещины в горном массиве и затем поливаемых водой. За счет действия капиллярных сил происходит расширение клиньев и разрушение горной породы.

Открытие взрывных методов разрушения произвело революцию в горном деле и увеличило многократно возможности горного производства.

Наблюдается прямая зависимость уровня развития государства с уровнем организации процессов разрушения горных пород при добыче полезных ископаемых. Общие объемы ведения взрывных работ в Советском Союзе были наибольшими в мире. Потребление взрывчатых веществ для нужд горного производства приближалось к 2 млн т в год. В России в настоящее время потребление взрывчатых веществ составляет половину этого количества.

Энергию взрыва для отделения горной массы от массива впервые применили 1627 году, когда тирольский горняк К. Вейндаль произвел взрывы черного пороха в Венгерском руднике. Преимущества такого способа оказались настолько очевидны, что через 10 лет взрывная отбойка велась на многих горных предприятиях Германии (современное название), Англии, Швеции и т.д. С тех пор и до настоящего времени взрывной метод отделения горной массы от горного массива доминирует во всем мире. Эволюция этого главного метода разрушения горной породы шла очень бурными темпами.

В первые годы применения энергии взрыва использовались в основном короткие шпуровые заряды диаметром 15–20 мм, для поджигания которых использовались серные фитили. Подобие буровой машины появилось впервые в 1683 году.

Бризантные взрывчатые вещества (ВВ) – нитроглицерин и пироксилин, – изобретенные в 1846 году, дали новый толчок развитию взрывных методов в горной промышленности. Новые ВВ позволили резко увеличить эффективность взрывной отбойки.

Следующим этапом развития взрывных работ в горной промышленности стал переход от шпуровых и котловых к скважинным зарядам. Создание высокопроизводительных буровых станков позволило перейти к современным условиям уступной отбойки на карьерах и высокопроизводительным системам отработки месторождений в подземных условиях.

В настоящее время взрывные работы являются доминирующим методом отделения породы от массива в горном деле. Они также широко используются в гидротехническом строительстве, при создании плотин, каналов, прокладке дорог и т.п.

Развитие науки и технологии применения взрыва в горной промышленности шло параллельно с развитием представлений о взрывных явлениях в целом.

**Взрыв – это процесс быстрого физического или химического выделения энергии, сопровождающегося образованием газообразных продуктов (рабочего тела).** Работа расширения газообразных продуктов переводит потенциальную энергию взрывчатого устройства в механическую энергию работы взрыва.

Самым существенным признаком взрыва является резкий скачок давления в среде, окружающей место взрыва. Это служит непосредственной причиной разрушительного действия взрыва. Источником энергии взрыва может быть не только химическое вещество, но и другие физические устройства, обеспечивающие аккумуляцию энергии (сжатый газ, электрическая энергия и т.п.).

Были сделаны попытки использования атомной энергии для обеспечения разрушения горной породы, но они оказались малоперспективными в основном из-за опасности выделения радиоактивных продуктов ядерного взрыва.

Взрывчатые вещества представляют собой относительно неустойчивые в термодинамическом смысле системы, способные под влиянием внешних воздействий к весьма быстрым экзотермическим превращениям, сопровождающимся образованием сильно нагретых газов или паров.

Газообразные продукты взрыва благодаря исключительно большой скорости химической реакции практически занимают в первый момент объем самого ВВ и находятся в сильно сжатом состоянии, вследствие чего в месте взрыва резко повышается давление. Таким образом, способность химических систем к взрывчатым превращениям определяется следующими тремя факторами: экзотермичностью процесса, большой скоростью его распространения и наличием газообразных продуктов реакции. Эти свойства у разных ВВ могут быть выражены в различной степени, однако только их совокупность придает процессу выделения энергии характер взрыва. Теплота реакции является критерием работоспособности ВВ и важнейшей ее характеристикой. Для взрывных работ также очень существенна плотность заряжения выбуренного пространства. Произведение плотности на удельную теплоту взрыва дает значение объемной концентрации энергии в зарядной полости. Чем выше этот показатель, тем эффективнее используется объем скважины. Для современных растворонаполненных взрывчатых составов плотность заряжения может достигать  $1,55 \text{ г/см}^3$ .

В зависимости от условий возбуждения химической реакции, характера ВВ и некоторых других факторов процесс взрывного превращения может идти в форме медленного термического разложения, горения или в форме детонации.

В горном производстве используются ВВ, работающие как в форме горения, так и в форме детонации. Работающие в режиме горения – это, как правило, пороха, применяющиеся при разделке штучного камня. Основная масса ВВ работает в режиме детонации.

Горение ВВ – самораспространяющийся процесс химического превращения вещества, происходящий в узкой зоне (пламени), которая перемещается по веществу в результате прогрева впередилежащих слоев по механизму теплопроводности или диффузионному теплообмену.

Детонация возникает в ВВ при ударно-волновом возбуждении. Она представляет собой процесс перемещения по ВВ узкой зоны химической реакции с постоянной сверхзвуковой скоростью.

Все взрывчатые вещества могут быть подразделены на две основные группы: взрывчатые химические соединения и взрывчатые смеси. Взрывчатые химические соединения представляют собой относительно неустойчивые химические системы, способные под действием внешних сил к быстрым экзотермическим превращениям, в результате которых происходит полный разрыв внутримолекулярных связей и последующая рекомбинация свободных атомов в термодинамические устойчивые продукты. Примером такого вещества, широко применяемого в нашей стране, является тротил, используемый в гранулированном виде.

Взрывчатые смеси (основные взрывчатые вещества, применяемые в горной промышленности) представляют собой системы, состоящие по крайней мере из двух химически не связанных между собой компонентов. Обычно один из компонентов смеси – это вещество, относительно богатое кислородом, а второй компонент – горючее вещество, не содержащее кислород или содержащее его в количестве, недостаточном для полного внутримолекулярного окисления. Взрывчатые смеси представляют собой газообразные, жидкие, твердые или гетерогенные системы. Взрывчатые вещества классифицируются по нескольким признакам: характерная в условиях эксплуатации форма химического превращения, чувствительность к простым видам внешнего воздействия, химическая природа или состав, область применения.

В зависимости от характерной формы химического превращения и назначения их подразделяют на метательные ВВ или пороха, бризантные ВВ и пиротехнические составы.

Механическая работа взрыва совершается за счет потенциальной химической энергии, которой обладает взрывчатое вещество. Поэтому энергия – теплота взрыва – важнейшая характеристика ВВ. Тем не менее величина работы в какой-либо конкретной форме определяется не только величиной энергии, но и рядом других параметров и факторов.

При взрыве зарядов ВВ основные формы работы взрыва в горном массиве следующие:

- измельчение и деформирование горной породы, прилегающей к заряду;

- дробление породы на сравнительно крупные куски; сдвигание и выброс раздробленной массы;
- необратимые деформации за пределами воронки выброса;
- распространение в горной породе волн напряжений;
- образование возмущений в воздухе.

Различные формы работы взрыва можно объединить в две основные группы.

Фугасное действие взрыва включает такие формы работы, как метательные, отбрасывающие, дробящие. Они обусловлены волной напряжения и продуктами взрыва. Эти формы определяют общие объемы взрывного разрушения горной породы.

Бризантное действие взрыва включает пробивные, дробящие действия взрыва. Эти воздействия на взрываемую породу определяют действие взрыва в непосредственной близости к заряду и обусловлены параметрами волны детонации.

Обобщение имеющихся данных показало, что фугасное действие взрыва практически не зависит от скорости детонации и пропорционально энергии взрыва.

На основе этого положения был сформулирован энергетический принцип работы взрыва. Он реализуется в расчетах параметров расположения зарядов. В таких расчетах общая масса ВВ определяется объемом взрываемой горной породы.

Являясь практически единственным средством разрушения больших объемов горных пород, взрывные работы в себестоимости добычи полезных ископаемых занимают всего 10–20 %. Если учесть, что КПД взрыва на дробление не превышает нескольких процентов, то станет очевидной необходимость дальнейшего совершенствования взрывного разрушения с учетом новых достижений науки и техники.

Наибольшее распространение на открытых горных работах получили гранулированные взрывчатые вещества, отвечающие требованиям горной технологии и механизации процессов их переработки и заряжания. Все шире применяются водонаполненные взрывчатые вещества, отличающиеся экономичностью и высокими энергетическими показателями.

Разработаны новые технологические схемы приготовления смесевых взрывчатых веществ на месте проведения взрыва, созданы новые средства доставки взрывчатых веществ и заряжания взрывных полостей на карьерах и в строительстве, новые схемы комплексной механизации взрывных работ.

Особенностью развития промышленных взрывов в современных условиях является то, что наряду с выполнением уникальных взрывов (взрыв в ущелье Медео при сооружении селезащитной плотины, взрыв в Байпазинском ущелье при создании плотины гидроузла на реке Вахш) крупные заряды ВВ помогают в решении повседневных задач горно-добывающей промышленности, когда од-

новременно взрываются заряды до 1000 т на открытых работах и до 100 т – на подземных.

При строительстве водно-транспортных магистралей, земляных плотин, насыпей, дамб и других мелиоративных объектов зачастую используют эффекты взрывного воздействия. Приложение к грунтам взрывных нагрузок сильно сказывается на их состоянии и последующем поведении в период эксплуатации. Поэтому для разработки эффективных технологий ведения взрывных работ в различных грунтах необходимы глубокие теоретические и экспериментальные исследования в области динамики грунтов, в том числе изучение параметров взрывных волн, закономерностей их распространения, характера деформирования при взрыве.

Энергия взрыва широко используется для вертикальной планировки строительных площадок, дноуглубительных работ, обрушения зданий, дробления фундаментов, корчевки пней, дробления валунов, при ледовых и других работах.

Таким образом, ведущая роль науки о взрыве в успешном внедрении новых технологических процессов на открытых и подземных горных работах совершенно очевидна. Это определяет тот научный интерес, который проявляется к вопросам физики действия взрыва в горных породах, определению оптимального ассортимента ВВ.

Отделение пород от массива и дробление их на куски заданных размеров является начальным процессом во многих геотехнологиях освоения недр, определяющим эффективность последующих процессов.

Научное описание процесса действия взрыва в горной породе, и в частности дробления горной породы, – очень сложная и актуальная проблема.

Процесс дробления горной породы зависит от большого числа факторов, связанных со свойствами как источника разрушающей энергии, так и самой разрушаемой среды. Научные проблемы механики взрывного дробления тесно переплетаются с проблемами общей механики твердого тела.

В горном деле нашли применение и невзрывные способы разрушения горной породы.

Термическое хрупкое разрушение скальных пород имеет место при огневом способе бурения и расширения взрывных скважин, термическом резании и обработке блоков строительного камня. При поверхностном нагреве в скальной породе возникают термические напряжения, обусловленные градиентом температур в направлении, перпендикулярном к поверхности нагрева (макроскопические напряжения), а также структурные термические напряжения, которые появляются из-за наличия в породе разных минеральных зерен и обусловлены различием их тепловых и упругих свойств, модуля упругости.

Для разрушения горных пород применяют также электротермическое воздействие на нее. Электротермические методы имеют такие преимущества, как объемный подвод энергии, высокую концентрацию мощности, возможность

дистанционной передачи энергии, избирательность воздействия. Объемный подвод энергии снимает ограничения, накладываемые на производительность процесса разрушения механической прочностью инструмента, малой скоростью распространения тепла за счет процессов теплопроводности. Возможность выделять энергию внутри массива горной породы без механического проникновения за его поверхность позволяет эффективно разрушать породу, по-новому проектировать элементарный процесс разрушения. Особенно перспективно применение токов сверхвысокой частоты (СВЧ), позволяющих фокусировать энергию на некоторой глубине в горной породе без контакта с ее поверхностью. Объемный подвод энергии позволяет повысить производительность процесса разрушения; ограничения производительности при этом связаны с конечной скоростью разрушения и удаления горной массы.

В горной промышленности применяется технология разрушения горных пород, базирующаяся на использовании тонких струй воды высокого давления.

Задача использования тонких струй воды высокого давления в исполнительных органах горных машин потребовала проведения разносторонних исследований, охватывающих динамику и формирование таких струй, взаимодействие струи с разрушаемым массивом, изучение процесса струйного разрушения горных пород при широком диапазоне их структуры и крепости, создание струй, а также формирующих их устройств исполнительных органов разрушения и др. Для расширения области применения тонких струй высокого давления, значительные исследования проведены по созданию комбинированного гидромеханического способа разрушения угля и породы, основанного на совместном воздействии на горный массив тонкой струи воды и механического (резцового, шарошечного, ударного) инструмента. На их основе разработаны конструкции очистных и проходческих комбайнов с гидромеханическими исполнительными органами.

Основной вклад в становление и развитие науки о средствах и способах разрушения горных пород внесли: А.А. Гриффитс, Г.Р. Ирвин, Л.Д. Ландау, А.Ю. Ишлинский, Я.Б. Зельдович, К.П. Станюкович, Ф.А. Баум, Л.И. Барон, М.М. Протодьяконов, Г.П. Демидюк, М.М. Садовский, Л.В. Дубнов, В.М. Кузнецов, Г.И. Покровский, В.Н. Родионов, Е.И. Шемякин и другие ученые.

#### 2.4.2. Объект исследования и задачи в области разрушения горных пород

**Разрушение горных пород – это наука о процессах нарушения сплошности природных структур горных пород (минеральных агрегатов или массивов) под действием внешних сил.**

Объект исследований составляют горная порода и механизм ее разрушения при использовании различных источников энергии и способов передачи энергии горному массиву.

К числу основных задач разрушения горных пород как науки следует отнести следующие:

- установление закономерностей разрушения и отделения горной породы от горного массива при извлечении из недр твердых полезных ископаемых;
- изучение традиционных и создание новых способов передачи горной породе внешней энергии, обеспечивающей ее разрушение;
- раскрытие механизма разрушения горной породы;
- выявление закономерностей изменения свойств горной породы, подвергнутой разрушению;
- изучение явлений, сопровождающих процессы разрушения и отделения горной породы от горного массива.

Разрушение горных пород как наука включает в себя в качестве основных ряд разделов.

В одном из них рассматриваются процессы передачи горной породе внешней энергии, обеспечивающей ее разрушение. Известны следующие способы разрушения: механический, взрывной, термический, гидравлический, электро-взрывной, комбинированный, соответствующие различным механизмам передачи энергии.

Имеются попытки использования и других физических и химических процессов передачи энергии горной породе.

Теория распространения микро- и макронарушений в горной породе составляет другой важный раздел разрушения горных пород. Исследования в этом разделе сосредоточены на изучении воздействия нагружения на структурные неоднородности горной породы на различном уровне (от дислокации кристаллов до видимых трещин в разрушаемых блоках), влияния скорости нагружения на процессы разрушения породы, характеристик прочности горных пород и методов их измерения, изменения прочностных и фильтрационных свойств горной породы.

Область знаний, развивающих теорию фрагментации горной породы под действием внешних нагрузок, включает описание процессов дробления горной породы под воздействием различных видов нагружения, видов распределения кусков по размерам и связи параметров распределения с видом нагружения.

Процессы взрывного разрушения горных пород как наиболее распространенного способа отделения горной породы от массива при освоении недр составляют крупный и весьма значимый в научном и практическом отношении раздел. Здесь совершенствуется теория работы взрыва в породе, изучается распространение волн напряжения и сейсмических волн в массиве, развивается теория распространения ударных воздушных волн, исследуются закономерности распространения пылегазовых выбросов. К этому разделу относят знания о создании и применении новых взрывчатых веществ, изготавливаемых непосредственно на горных предприятиях, о проектировании и безопасном ведении взрывных работ.

В обширную область научных знаний объединяются исследования естественных процессов разрушения горных пород, связанных с оползнями, обвалами, оседаниями, тектоническими разломами и т.д.

До последнего времени наука о процессах разрушения горных пород под действием различных сил изучалась в рамках традиционной механики твердого тела. Для описания процессов разрушения использовались закономерности, установленные в теории упругости и пластичности: реологические свойства изучались в теории ползучести. Однако поведение горных пород имеет много специфических особенностей, связанных с неоднородностью свойств горного массива, и поэтому закономерности поведения среды, установленные в основном для однородных сред, имеют ограниченное применение в решении задач горной механики. Физические явления в горной породе достаточно специфичны и требуют специальных знаний и методических подходов для их решения.

Особенности применения энергии взрыва в освоении недр определили необходимость выполнения широкого круга исследований по изучению свойств взрывчатых веществ, предназначенных для горного производства, особенностей работы взрыва, необходимых условий безопасности.

Разрушение горных пород как наука связано со многими отраслями знаний: физикой и механикой твердого тела; физикой образования и распространения микро- и макронарушений; теорией дислокаций; теорией упругости, пластичности, ползучести и реологией; физикой и механикой быстро протекающих процессов; теорией горения и детонации взрывчатых веществ; теорией образования и распространения сейсмических волн; теорией распространения воздушных ударных волн; теорией образования и распространения аэрозолей в атмосфере; теорией дробления и измельчения материалов; физикой и механикой фильтрации жидкости и газа в пористых средах; теорией вероятностей при описании статистических закономерностей распределения крупности отдельных и распределения свойств горного массива.

#### 2.4.3. Современные проблемы в области разрушения горных пород

Дробление горной породы в процессе ее отделения от горного массива определяет эффективность всех последующих процессов ее переработки, поэтому установление механизма разрушения и способов управления этим механизмом – главная задача науки о разрушении горных пород.

Для реализации процесса разрушения необходимо передать разрушаемой среде требуемое количество энергии из внешних источников. Разработка таких источников и способов их применения – следующая важнейшая задача науки о разрушении горных пород.

Крупной и актуальной проблемой является создание теории распространения микро- и макронарушений в горном массиве, теоретических основ развития зон нарушенности. Важно выяснить роль различных факторов, влияю-

щих на процессы трещинообразования при динамических воздействиях на массивы.

Одной из острых остается проблема повышения эффективности взрывного разрушения горных пород, что по-прежнему связано с разработкой новых взрывчатых веществ для горнодобывающей промышленности. В нашей стране в горной промышленности применяли в основном взрывчатые вещества (гранулированные, тротилосодержащие), изготавливаемые на заводах оборонной промышленности. В настоящее время, в условиях рынка, применение таких составов экономически неоправданно, горная промышленность нуждается в дешевых бестротилового составах, допускающих изготовление ВВ непосредственно на горных предприятиях, на месте применения.

Остро ощущается потребность в предохранительных взрывчатых веществах для шахт, опасных по газу и пыли. За последние несколько десятилетий в нашей стране не было разработано ни одной рецептуры новых эффективных видов предохранительных ВВ.

Необходимо компьютеризировать все процессы, связанные с проектированием и ведением взрывных работ, разработать программы расчета зон безопасности по различным факторам при ведении взрывных работ в соответствии с действующими нормативными документами.

**Приоритетные научные направления исследований в области разрушения горных пород.** При совершенствовании существующих и разработке новых способов взрывного разрушения горных пород в первую очередь следует указать на развитие теории взрыва в горной породе и познание механизма трещинообразования при взрыве, на создание высокоэффективных способов регулирования направленным действием взрыва как основы для разработки новых типов взрывчатых веществ для горной промышленности и новых видов средств механизации взрывных работ.

Взрывчатые вещества, разрабатываемые для горнодобывающей промышленности, должны допускать возможность их изготовления непосредственно на месте применения. Использование на горных предприятиях таких взрывчатых веществ позволяет существенно снизить затраты на взрывные работы и уменьшить опасность, связанную с транспортированием и хранением больших количеств взрывчатых материалов.

Основная проблема в этой области – разработка взрывчатых составов повышенной энергии без взрывчатых сенсibilизаторов. ВВ должны иметь минимальное количество токсичных компонентов в продуктах детонации, обладать водоустойчивостью и сравнительно низкой вязкостью, позволять достаточно быстро производить зарядку скважин.

Для решения этой проблемы необходимо совершенствовать рецептуры различных видов взрывчатых веществ местного изготовления: простейших смесевых веществ типа игданитов, водосодержащих типа ГЛТ и ифзанитов, эмульсионных типа поремитов. Следует помнить, что все указанные виды взрывчатых

веществ местного изготовления имеют свои достоинства: простейшие смесевые – минимальную стоимость; эмульсионные – водоустойчивость; водосодержащие – возможность получения максимальной концентрации энергии в зарядной полости.

Решение многих вопросов обусловлено созданием теории передачи горной породе внешней энергии, обеспечивающей ее разрушение, и принципов управления этим процессом. В этом имеет большое значение анализ различных физических явлений для выяснения возможности создания способов разрушения горных пород, альтернативных взрывному. К такого рода явлениям относятся те, которые связаны с организацией направленного и, в той или иной степени, локализованного в массиве горной породы потока энергии. Возможности современной техники по организации таких потоков весьма широки, однако их применение для разрушения горных пород изучено еще недостаточно. Тем не менее некоторые обоснованные суждения по поводу перспективности того или иного способа можно высказать.

Наиболее распространенным способом разрушения горной породы является механический с использованием различного вида инструмента. Наряду с традиционными направлениями исследования взаимодействия инструмента и породы перспективным может оказаться направление, исследующее это взаимодействие в присутствии веществ, ослабляющих приповерхностную прочность горной породы.

Другим весьма распространенным способом разрушения горной породы является способ гидравлического ее отделения от массива. Здесь перспективные направления исследований лежат в области использования абразивных добавок и комбинации гидровоздействия с механическим воздействием.

Исследование способов воздействия на горную породу, предусматривающих использование высокоскоростного удара и кумуляции, также заслуживает внимания. Однако область их применения будет, видимо, ограничена специальными видами работ (например, разрушение негабаритных кусков породы).

Наименее исследованным из семейства механических способов воздействия на горную породу является вибрационный. Определенные перспективы его использования имеют место, но явно ощущается недостаток информации о его особенностях.

Большая группа способов основана на термовоздействии. Энергетические характеристики способов, использующих пламя и потоки плазмы, таковы, что широкомасштабное их применение вряд ли будет оправданно, тем более что возникающие при этом экологические проблемы весьма серьезны. Другие способы, входящие в эту группу, связаны с процессами преобразования энергии электромагнитных колебаний различных частотных диапазонов в тепловую энергию, передаваемую горной породе. Наименее перспективными с точки зрения учета удельных энергозатрат являются лазерный и инфракрасный способы.

Использование колебаний СВЧ-диапазона представляет определенный практический интерес, и исследование этого способа воздействия должно продолжаться.

Электромагнитное поле предоставляет возможность организации ударного воздействия на горную породу, оно может быть реализовано в результате осуществления электропробоя горной породы либо в статическом электрическом поле, либо в электромагнитном импульсе с достаточно высоким уровнем напряженности электрической составляющей поля. Исследования в этих направлениях вполне оправданны, хотя сфера применения такого рода воздействий ограничена.

Определенный интерес представляет изучение комбинированных воздействий, например термомеханического, виброэлектромагнитного и т.п. Используя потоки энергии различных полей, можно уменьшить удельные энергозатраты на разрушение того или иного объема горной породы.

Оценка удельных энергозатрат, характерных для каждого из упомянутых способов разрушения горной породы, показывает, что ни один из них не может конкурировать с взрывным. Определенные преимущества некоторых из них возникают только при учете экологических последствий их применения. На этом фоне достаточно интересным, по крайней мере в научном плане, представляется недавно разработанный способ воздействия на горную породу с помощью газовых или жидкостных химически активных по отношению к разрушаемому материалу струй. Принципиальным его преимуществом перед другими способами воздействия является использование энергии химической реакции, возникающей при контакте струи с разрушаемым материалом, что влечет за собой существенное уменьшение энергозатрат.

Весьма актуальной является в настоящее время проблема компьютеризации расчетных методов проектирования и ведения взрывных работ, в том числе создание автоматизированных систем управления способами взрывного разрушения горных массивов на основе анализа данных о структуре и механических свойствах разрушаемой среды.

Приобретает все большую актуальность разработка экологически безопасных способов ведения взрывных работ на горных предприятиях, а также создание методов снижения экологических последствий ведения взрывных работ, что предполагает в первую очередь экологическую безопасность собственно взрывчатых составов, применяемых в освоении недр.

#### **Список литературы к разделу 2.4**

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. – М.: Недра, 1993.
2. Кравец В.Г., Лучко И.А., Михалюк А.В. Использование энергии взрыва в мелиоративном строительстве. – М.: Недра, 1987.

3. Физика взрыва / *Ф.А. Баум [и др.]*; под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975.
4. *Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И.* Промышленные взрывчатые вещества. – М.: Недра, 1982.
5. *Демидюк Г.П., Бугайский А.Н.* Средства механизации и технология взрывных работ с применением гранулированных взрывчатых веществ. – М.: Недра, 1975.
6. *Ефремов Э.И., Вовк А.А.* Справочник по взрывным работам. – Киев: Наукова думка, 1983.
7. *Мосинец Э.Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976.
8. *Дмитриев А.П., Гончаров С.А.* Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1990.
9. Электротермическое и электротермомеханическое разрушение крепких горных пород / *В.Ф. Бызов [и др.]*. – Киев: Техніка, 1989.
10. *Никонов Т.П., Кузьмич И.А., Гольдин Ю.А.* Разрушение горных пород струями воды высокого давления. – М.: Недра, 1986.
11. *Протасов Ю.И.* Разрушение горных пород: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – 455 с.
12. *Каркашадзе Г.Г.* Механическое разрушение горных пород: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 222 с.
13. *Мангуш С.К.* Взрывные работы при проведении подземных горных выработок: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 120 с.

## 2.5. Рудничная аэрогазодинамика

### 2.5.1. Общие положения и развитие знаний в области рудничной газодинамики

***Рудничная аэрогазодинамика – наука о процессах аэрогазодинамики при освоении георесурсов в недрах.***

Под аэрогазодинамическими процессами понимают процессы выделения газов из горных пород в результате извлечения георесурсов, распространения газов в воздушных потоках и взаимодействия газоздушных потоков с окружающей средой. К ним относятся:

- образование и миграция газов в земной коре;
- выделение их из разгруженного горного массива;
- перенос газообразных примесей как от природных (из вмещающих пород), так и искусственных источников выделения (газы, выделяющиеся при взрывных работах, при работе дизельного оборудования и др.) в вентиляционных сетях, включающих горные выработки, зоны обрушений (выработанные пространства) и горный массив;
- процессы поступления и рассеивания рудничных газов в атмосфере Земли.

Из вышесказанного следует, что рудничные аэрогазодинамические процессы весьма разнообразны. Однако этим процессам присущи единая физико-механическая основа и общие специфические условия их протекания:

- наличие как точечных, так и линейных неравномерно распределенных источников газовыделения;
- нестационарность в пространстве и времени источников газовыделения и характеристик вентиляционной сети;
- большая протяженность, высокая и неравномерная шероховатость воздухопроводов (горных выработок), высокая вероятность их значительной обводненности;
- протекание процессов в сложных сетях, включающих пористые среды больших объемов с высокой анизотропией фильтрационных параметров (вырабатываемые пространства, газопроницаемые породы).

Эта специфика позволяет выделить процессы рудничной аэрогазодинамики как особую группу сложных процессов, не имеющих аналогов в смежных отраслях науки.

Выделение горючих и взрывоопасных газов в рудниках и шахтах и меры защиты от них с давних пор являлись предметом пристального внимания горняков, причем уже в конце XIX века проводились серьезные научные исследования рудничной атмосферы. Развитие рудничной аэрогазодинамики в СССР началось в 30-х годах прошлого века. Это было связано в первую очередь с интенсификацией добычи полезных ископаемых, сопровождающейся увеличением объемов буровзрывных работ и необходимостью эффективного удаления газов от ВВ. Особую роль в становлении новой науки сыграло развитие подземной угледобычи на метанообильных месторождениях Донбасса, Кузбасса и Караганды. Специфика аэрогазовых процессов в угольных шахтах проявляется в еще большей степени, поэтому задачи изучения и управления ими приобретают более сложный характер.

В начальной стадии изучение газодинамических процессов было в основном направлено на решение задач, связанных с газоносностью пластов и газообильных шахт. Интенсивность и закономерности выделения метана в горные выработки определяются в первую очередь его природой, генезисом, формами взаимосвязи с углем – именно эти вопросы решались наиболее интенсивно на первом этапе развития газовой динамики и угольных шахт. В решение этих задач большой вклад внесли советские ученые Г.Д. Лидин, В.В. Ходот, И.Л. Эттингер.

Первым этапом изучения процессов распространения примесей вентиляционными потоками было установление характера силового взаимодействия движущегося воздушного потока с ограничивающими поверхностями или встречающимися на его пути различными предметами. В рудничной аэрологии эта задача сводилась к изучению взаимодействия воздуха со стенками горных выработок, силовых проявлений в воздушном потоке на участках местных сопротивлений, взаимодействия воздуха с дробленными горными породами при его

фильтрации через выработанные пространства, бункеры, рудоспуски, и, наконец, взаимодействия потока с различного рода предметами, находящимися в выработках.

Наиболее глубоко изучались вопросы взаимодействия потоков со стенками горных выработок, связанные с установлением закона сопротивления, определением сопротивлений трения и исследованием влияния на них специфических горных факторов. Большой вклад в эти исследования внесли советские ученые, по существу создавшие основы рудничной вентиляции: Ф.А. Абрамов, В.Н. Воронин, В.Б. Комаров, А.И. Ксенофонтова, Н.И. Мустель, А.А. Скочинский. Эти исследования создали надежную основу расчета основных параметров движения воздуха в горных выработках. В настоящее время такие расчеты проводятся с высокой точностью на стадии проектирования и при практической организации вентиляции.

Дальнейшие работы в 50–60-е годы прошлого века были направлены на исследование закономерностей выделения метана в горные выработки. Исследовались, в частности, вопросы интенсивности газовыделения из различных источников, его неравномерности и методы расчета и управления процессами газовыделения. Изучением этих вопросов занимались многие исследователи в СССР и за рубежом: А.Т. Айруни, Н.Ф. Гращенков, О.Р. Гершун, М.А. Ермеков, С.Г. Калиев, А.Д. Кизряков, Ф.С. Клебанов, А.А. Колмакова, А.Е. Красноштейн, И.И. Медведев, А.А. Мясников, С.Н. Осипов, А.Э. Петросян, И.В. Сергеев, А.А. Скочинский, Э.М. Соколов, Б.Г. Тарасов, А.С. Цырульников, Bruyet V., Otto L., Potteisky K., Winter K. и др.

Особую область аэрогазодинамических явлений в угольных шахтах занимают процессы диффузии метана в воздушных потоках. Практическая значимость таких процессов в значительной степени усилилась в связи с проблемой местных скоплений метана и в особенности так называемых слоевых скоплений. Местные скопления метана есть не что иное, как проявление своеобразных диффузионных процессов, характеризующихся наличием высоких градиентов концентрации. Изучение процесса диффузии метана в горной выработке интенсивно проводилось в Англии (Bakke P., Leach S.J., Raine E.J.) и в СССР (А.И. Бобров, Н.М. Кошелев, Б.Г. Тарасов, К.З. Ушаков) с использованием теории турбулентной диффузии для анализа процесса. Выполненные работы позволили установить закономерности изменения основных характеристик турбулентности, разработать методы расчета распределения концентрации метана в горных выработках и необходимого количества воздуха, обеспечивающего достижение безопасных концентраций газа.

Изучение аэрогазодинамических процессов было интенсивно продолжено в связи с постановкой в 60-х годах задачи автоматизации управления вентиляцией газовых шахт и необходимостью повышения степени представления и описания физического характера процессов до уровня, соответствующего возможности автоматического управления ими. Важнейшую роль в решении этой

задачи играет надежный контроль параметров шахтной атмосферы, что потребовало создания соответствующих датчиков и систем контроля, базирующихся на объективном знании закономерностей рудничной аэрогазодинамики. Автоматические датчики скорости воздуха и концентрации метана появились вначале как технические средства исследовательского характера, в дальнейшем были разработаны системы телеконтроля параметров атмосферы, пригодные для систематического практического использования.

С внедрением механизированных комплексов и увеличением объема горных работ в 60-х годах возникла проблема «газового барьера», вызвавшая развитие нового направления – управления газовой выделением в угольных шахтах. Одним из основных факторов, определявших режим управления вентиляцией шахт, являются переходные газодинамические процессы, имеющие место при регулировании количества воздуха на выемочных участках шахт. Поэтому в рамках проблемы автоматического управления вентиляцией в 70-е годы исследование переходных процессов занимает основное место, причем существенную роль здесь играют процессы аэрогазодинамики систем горные выработки–выработанное пространство. Изучением этих сложных процессов, относящихся к классу турбулентных пространственных течений через крупнокусковую пористую среду, занимались А.М. Карпов, Ф.С. Клебанов, А.А. Колмаков, А.Ф. Милетич, А.А. Мясников, И.М. Печук, Л.А. Пучков, К.З. Ушаков и др.

Одновременно с исследованиями аэродинамических методов управления выделением метана ведутся интенсивные исследования и разработка новых методов дегазации угольных месторождений, в том числе с изменением природной газопроницаемости массива горных пород путем их физико-химической обработки, с использованием микробиологического воздействия.

Развитием методов и средств управления газовой выделением из основных источников аэродинамическими и газодинамическими методами, разработкой моделей и алгоритмов автоматического управления вентиляцией и дегазацией, созданием АСУ вентиляции и дегазации с целью повышения безопасности ведения горных работ характеризуются 80-е годы прошлого века.

С развитием эффективных способов дегазации угленосной толщи проблема управления газовой выделением в 90-х годах приобретает важный экологический аспект, связанный с необходимостью создания систем экологического мониторинга рудничных газов и утилизации шахтного метана в целях снижения загрязнения земной атмосферы вредными газами, выделяющимися при добыче полезных ископаемых.

#### 2.5.2. Объекты исследований и задачи рудничной аэрогазодинамики

По мере развития рудничной аэрогазодинамики происходит расширение спектра решаемых задач и объектов исследований. В свете современных представлений объекты исследований этой науки можно определить следующим образом.

**Объектами рудничной аэрогазодинамики** являются недра земной коры, источники георесурсов, системы горных выработок при освоении георесурсов, строительстве и эксплуатации горных сооружений, окружающая среда горнодобывающих регионов, мест эксплуатации сооружений и подземного размещения отходов.

Горные породы, слагающие земную кору, содержат различные газы (аммиак, водород, метан, радон, углекислый газ, оксиды азота и серы, сероводород, оксид углерода, образующиеся при фильтрации воздуха через поры и трещины в массиве, а также при пожарах) как в свободном, так и в сорбированном состоянии, которые при отработке месторождений (или использовании подземных пространств) поступают в горные выработки и затем на поверхность – в земную атмосферу. Кроме того, при работе технологического оборудования тоже выделяются вредные и ядовитые газы, особенно при использовании двигателей внутреннего сгорания (сернистый газ, акролеин, формальдегид). Незначительные количества ядовитых газов могут выделяться из минеральных источников, пересекаемых горными работами. Состав и объемы выделяющихся газов существенно зависят от геологических условий месторождений, физико-химических свойств горных пород и выделяющихся газов, от принятых схем вскрытия и подготовки, схем и способов проветривания, систем разработки и организации технологического процесса.

Условия газоотдачи – десорбции газов из горных пород, а также закономерности движения газовых смесей и поступления газов (газовыделение) в вентиляционную сеть и дегазационные скважины различны для нетронутого массива, для зон его разгрузки и сдвижений для обрушенных пород и отбитой массы полезного ископаемого, т.е. определяются состоянием массива.

Протекание процессов распространения газов (газоперенос) в горных выработках и выработанных пространствах зависит от характера изменения состояния подрабатываемого массива, который, в свою очередь, определяется технологией ведения работ и их интенсивностью, и от аэродинамических параметров вентиляционной сети.

Для повышения безопасности ведения горных работ и снижения загрязнения земной атмосферы рудничными газами требуется знание указанных закономерностей, на основе которых можно обеспечить управление аэрогазовыми процессами в шахтах (рудниках). Это и определяет основную цель рудничной аэрогазодинамики.

**Цель рудничной аэрогазодинамики** – создание теории, методов и средств расчета, контроля и управления аэрогазодинамическими процессами, развивающимися в горных породах, зонах сдвижений и обрушений горных пород и горных выработках.

Понятие управления газодинамическими процессами включает в себя общее снижение абсолютной газообильности участка и перераспределение газовой выделенности во времени и пространстве таким образом, чтобы в любой точке вен-

тиляционной сети обеспечивались безопасные концентрации вредных газов. Управление газовыделением возможно в двух направлениях: предотвращение газовыделения в горные выработки; предотвращение опасностей и вредностей, возникающих в результате газовыделения.

Из поставленной цели вытекают задачи, решаемые в рамках данной науки, которые укрупненно можно сформулировать следующим образом.

**Задачи рудничной аэрогазодинамики** – исследование закономерностей протекания аэрогазодинамических процессов в массиве горных пород, обрушенных породах и горных выработках, разработка механических и математических моделей процессов и явлений аэрогазодинамики, методов их расчета, способов и средств дегазации массивов горных пород, добычи газов, способов и средств вентиляции систем горных выработок, диффузии газов в вентиляционных потоках, способов и средств контроля и управления аэрогазодинамическими процессами.

Закономерности аэрогазодинамических процессов первоначально изучались с помощью натуральных наблюдений и экспериментов, затем – путем физического и математического (на основе уравнений математической физики, полуэмпирических теорий массопереноса, вероятностных методов и т.д.) моделирования. Однако в связи со сложностью математического описания этих процессов, обусловленной вышеперечисленными специфическими условиями их протекания, наиболее рациональным представляется следующий путь: разработка упрощенного описания механизма аэрогазодинамических явлений (на основе результатов натуральных наблюдений физического моделирования) и последующее исследование с помощью математических моделей, в интегральной форме учитывающих влияние наиболее значимых факторов. На основе таких моделей разрабатываются методы расчета аэрогазодинамических процессов в шахтах, прогнозирования их параметров, контроля и управления ими.

### 2.5.3. Научные направления современной рудничной аэрогазодинамики

Основные научные направления современной рудничной аэрогазодинамики:

- 1) разработка теории генезиса и форм взаимосвязи газов с горными породами, создание методов оценки газоёмкости и газоносности горных пород;
- 2) разработка математических моделей и решение задач выделения газов при вскрытии газоносных структур, разрушении горных пород, проведении подготовительных и очистных горных работ;
- 3) разработка теории, методов расчета, технологических схем и технологических средств вентиляции систем горных выработок и выработанных пространств;
- 4) создание методов и средств газового мониторинга в процессе инженерной деятельности человека в земной коре, обеспечение газовой защиты людей

и горных работ, управление процессами выделения, распределения и удаления вредных газов из горных выработок;

5) разработка теории и методов заблаговременной дегазации, добычи и утилизации газов месторождений твердых полезных ископаемых;

б) разработка теории, методов расчета, средств предупреждения и защиты от эндогенных пожаров.

Эти направления тесно взаимосвязаны. Рассмотрим кратко содержание каждого из них.

1. Генезис месторождений определяет газоносность пород и состав газов, в них содержащихся.

Результаты исследований по первому направлению обеспечивают возможность прогнозирования потенциальных запасов газа в месторождениях, эффективности дегазации пластов, оценки газовой опасности шахт и рудников.

2. Исследования закономерностей выделения газов в горные выработки представляют собой второе направление в рудничной аэрогазодинамике.

Источниками газовой выделению в шахтах, как отмечалось выше, являются горные породы, работающее оборудование и взрывные работы. Две последние группы источников можно рассматривать как точечные, интенсивность которых определяется преимущественно техническими параметрами и не представляет собой сложности для описания и расчета. Газоносные породы представляют собой распределенные источники с изменяющейся во времени интенсивностью. Адекватное математическое описание их представляет существенное научное и практическое значение.

Применительно к метану различают три вида выделения газа с обнаженных поверхностей: обыкновенное, суфлярное и внезапное (внезапный выброс).

Обыкновенное выделение метана происходит через мелкие трещины и поры на поверхности угольного массива. Оно пропорционально газоносности, газопроницаемости и газовому давлению. Интенсивность его зависит также от характера производственных процессов, изменяющих условия дегазации массива.

К суфлярным относят выделение метана из крупных, видимых трещин и пустот в горном массиве, которые могут быть как природного, так и эксплуатационного происхождения. Опасность суфляров обусловлена их неожиданностью, а также тем, что они способствуют образованию слоевых скоплений метана в выработках.

Внезапные выбросы возникают под действием горного давления, энергии газа, заключенного в угле или породе, и при изменении прочностных параметров угольных пластов и пород в процессе ведения горных работ. При внезапном выбросе за короткий промежуток времени в выработку выделяется огромное количество газа (до 50 тыс. м<sup>3</sup>) и выбрасывается значительное количество угольной (или породной) мелочи (до 15 тыс. т). Внезапные выбросы обычно происходят при вскрытии опасных пластов и пересечении зон геологических наруше-

ний; они приурочены к участкам пласта или пачкам угля, имеющим пониженную прочность и слабый контакт с вмещающими породами.

Исследование механизма и закономерностей развития этих явлений является основой для разработки мер защиты от них.

Газовыделение из выработанных пространств имеет место в выработках, оконтуривающих зону обрушения. В выработанные пространства метан поступает из угольных пластов и пропластков, невынимаемых целиков и пачек, попадающих в зону обрушения, а также из сближенных пластов в разгруженной части массива – из подработанной и надработанной толщ пород. Фильтрация газа из выше- и нижележащих слоев осуществляется под действием разности давлений газа в невынимаемых пластах и в выработанном пространстве.

Газовыделение в горные выработки из горных пород зависит от ряда горно-геологических и горно-технических факторов. Важнейшими из них являются: газоносность пород, фильтрационные свойства массива и обрушенных пород, а также интенсивность выемки полезного ископаемого (скорость подвигания очистных и подготовительных забоев). Все источники газовыделения условно подразделяются на три группы: обнаженные поверхности горных пород (пластов), отбитая горная масса и выработанные пространства. Интенсивность первых двух источников выделения газа непосредственно зависит от технологии выемки и темпов подвигания забоев, т.е. эти источники практически не связаны с аэродинамикой участка. Третий источник – выработанные пространства – является наиболее сложным для формализованного описания, так как процесс выделения метана в данном случае в значительной степени определяется утечками воздуха через обрушенные породы. Условия поступления метана в область фильтрационного потока утечек также достаточно сложны, и взаимодействие потока утечек с процессами десорбции метана из вмещающего массива при его разгрузке практически не изучено. Прогноз газовыделения затрудняется тем, что источники его многочисленны и различны как по интенсивности, так и по своей локализации в пространстве.

Установлено, что метановыделение из вмещающего массива в выработанные пространства тесно связано с процессами сдвижения пород в ходе очистной выемки. Наиболее интенсивно газоотдача происходит в зоне частичной разгрузки от горного давления, которая перемещается вслед за лавой. Так же перемещается и зона интенсивного проветривания обрушенных пород. Взаимоналожение этих зон приводит к определенному квазистационарному распределению метана в выработанном пространстве. Вблизи очистного забоя концентрации минимально низкие, по мере удаления в глубь выработанного пространства они возрастают, достигая максимума примерно на границе зоны интенсивного проветривания, и затем снижаются и стабилизируются на некотором уровне в зоне уплотнения обрушенных пород. Для ряда схем проветривания (с двусторонним примыканием выработок к выработанному пространству) положение зоны высоких концентраций зависит от интенсивности фильтрационного потока утечек.

Математические модели процессов газовой выделенной являются теоретической базой для решения вопросов, связанных с расчетом и проектированием вентиляции и дегазации шахт и рудников, управлением проветриванием.

3. Основное назначение систем вентиляции – обеспечение подачи необходимого объема воздуха для разбавления до безопасных концентраций вредных газов, выделяющихся в горные выработки. Расчет параметров вентиляционных систем шахт и рудников базируется на закономерностях рудничной аэродинамики и закономерностях распространения газообразных примесей в вентиляционных сетях.

Рудничная аэродинамика рассматривает процессы движения воздуха в горных выработках как случай отсутствия заметных эффектов сжатия. Соответственно этому основные законы аэромеханики (уравнение аэростатики, закон Паскаля, закон Архимеда, законы сохранения массы и энергии) применительно к условиям горных выработок отражают специфику шахтных вентиляционных потоков.

В горных выработках имеют место потоки разных типов: ограниченные (с твердыми границами), полуограниченные и свободные струи. Знание законов движения ограниченных потоков требуется для организации вентиляции протяженных выработок, а законов движения свободных струй – для организации вентиляции камер, тупиковых забоев и т.п.

Важнейшее практическое значение имеет изучение условий формирования и разрушения местных, особенно слоевых, скоплений метана. В связи с этим исследуются и разрабатываются разнообразные способы изменения структуры воздушного потока и соответственно распределения концентраций метана в сечении выработки (искусственное увеличение шероховатости кровли, применение турбулизирующих трубопроводов, пульсирующее проветривание и т.п.).

Формирование аэродинамических параметров является достаточно сложной задачей, так как требует глубокого воздействия на структуру потока. Эта задача приобретает особое значение при создании систем автоматического управления вентиляцией газовых шахт, поскольку основная информация о состоянии объекта управления передается датчиками измерения скорости воздуха и концентрации метана в различных пунктах вентиляционной сети. При этом в местах измерения данных параметров необходимо локальное изменение структуры потока, обеспечивающее распределение характеристик турбулентности таким образом, чтобы точечные измерения отражали бы средние значения параметров.

Важным вопросом проектирования вентиляции шахт, а также автоматического управления проветриванием являются расчеты распределения воздуха в вентиляционной сети. Эти расчеты, требующие применения итерационных методов, достаточно трудоемки. На первых стадиях изучения этих процессов были разработаны и широко применялись методы электро моделирования, использующие электроанalogии. С появлением современных быстродействующих

ЭВМ аналоговые модели были вытеснены цифровыми, которые в настоящее время широко используются в практике проектирования вентиляции и САУП. Следует отметить, что инженерное развитие методов и средств расчета сетей привело к их отрыву от базы этих расчетов – надежного определения параметров аэрогазодинамических процессов, в частности, параметров аэродинамики выработанных пространств, что существенно сказывается на точности и достоверности расчетов.

Важнейшей задачей для выемочного участка, т.е. в основных местах потребления свежего воздуха, является расчет распределения воздуха в системе горные выработки–выработанные пространства. Анализ уравнений турбулентной фильтрации показал, что в этих уравнениях в диапазоне реальных режимов движения воздуха через обрушенные породы необходимо в равной мере учитывать действие как вязкостных, так и инерционных сил. Поэтому описания распределения давлений и скоростей в утечках должны базироваться на универсальном законе сопротивления, учитывающем потери энергии на трение и преодоление сил инерции.

4. Обеспечение безопасности горных работ по газовому фактору может достигаться двумя путями – повышением интенсивности проветривания за счет увеличения расходов подаваемого воздуха и путем управления газовыделением. Необходим также надежный контроль газовыделения в горные выработки, и в первую очередь из выработанных пространств – естественных резервуаров метана, активно реагирующих на изменение аэрогазодинамических параметров сети. Для достижения действенного контроля параметров шахтной атмосферы требуется создание системы газового мониторинга, базирующейся на объективном знании закономерностей рудничной аэрогазодинамики. Выбор мест размещения датчиков, частота их опроса, алгоритмы сглаживания – все эти элементы системы контроля должны основываться на глубоком понимании газодинамических процессов в шахте.

Наиболее важным вопросом в системе мониторинга метана является вопрос о надежности отражения реальных газодинамических процессов по локальным во времени и пространстве показаниям датчиков концентрации метана и скорости воздуха. На настоящее время можно считать решенными вопросы расположения датчиков в вентиляционной сети – размещение пунктов замера определяется распределением газового баланса шахты в целом и отдельных выработок, а также структурой сети.

В перспективе газовый мониторинг выемочных участков и шахты в целом должен включать контроль не только метана, но и других вредных газов, выделяющихся при ведении горных работ и попадающих атмосферу с исходящей вентиляционной струей. В этом случае газовый мониторинг как отдельная подсистема органически войдет в систему экологического мониторинга шахты. Основные задачи экологического мониторинга шахтных газов – выявление источников загрязнения атмосферы вредными и ядовитыми газами, а также определение зако-

номерностей их выделения во взаимосвязи с технологическими и геологическими факторами, что позволит обеспечить обоснованное прогнозирование выбросов. Поскольку любые аварийные газодинамические явления приводят к дополнительному выбросу в атмосферу Земли значительных объемов вредных и ядовитых газов, выбор методов и способов управления газовойделением в шахтах должен проводиться с учетом возможных экологических последствий.

Существующие методы управления газовойделением в шахтах по объекту воздействия подразделяются на газодинамические, аэродинамические и комбинированные.

Суть газодинамических методов заключается в изменении газообильности выработок при воздействии на давление и режим движения газа, сопротивление массива. К ним относятся: порядок отработки пластов в свите, выемочных столбов и слоев (при отработке мощных пластов), система разработки и способ управления кровлей и все способы дегазации массива и выработанных пространств.

Суть аэродинамических методов состоит в изменении концентрации газа в выработках путем изменения количества воздуха, а также скорости, направления его движения. К ним относятся: увеличение расхода воздуха (в общей струе или в местах скопления газа), скорости его движения, изменение направления движения утечек через выработанное пространство.

Комбинированные способы включают в себя газодинамическое и аэродинамическое воздействия.

На сегодня вопросы защиты атмосферы стоят очень остро, что требует пересмотра вопросов управления газовойделением. С точки зрения экологии целью этих мероприятий должен быть организованный отвод метана, обеспечивающий обязательное последующее использование его в промышленности или для бытовых нужд, при соблюдении допустимых концентраций газа в вентиляционной сети шахты. Иными словами, необходимо определять рациональное соотношение вентиляции и дегазации с точки зрения минимальных выбросов в окружающую среду.

В решении задач этого направления выработанным пространствам отводится важная роль. С одной стороны, преобладание доли выработанного пространства в газовом балансе выемочных участков высокогазобильных шахт повышает роль дегазации этого источника, с другой стороны, высокая проницаемость зон обрушения при современных темпах подвигания забоев позволяет использовать их для перераспределения метановыделения в пространстве путем изменения направления движения утечек и обособленного разбавления потоков газа, выделяющегося из различных источников за счет применения соответствующих схем проветривания выемочных участков.

Задача повышения экологической безопасности угольных шахт связана с изучением взаимодействия процессов вентиляции и дегазации и определением аэродинамических режимов, обеспечивающих добычу кондиционного метана,

пригодного для утилизации. В случае применения любого способа дегазации выработанного пространства дегазационная система включается в единую аэродинамическую сеть дегазационные скважины (выработки, перфорированные трубы)–выработанное пространство–горные выработки. При этом концентрации метана как в скважинах, так и в выработках участка будут зависеть от газовой ситуации в выработанном пространстве.

Повышение эффективности как аэродинамических, так и газодинамических методов управления газовой выделением базируется на исследованиях аэрогазодинамики выработанных пространств, поэтому развитие исследований аэрогазодинамики выработанных пространств необходимо для решения в комплексе задач безопасности, попутной добычи метана и охраны окружающей среды при ведении горных работ.

5. На современных глубинах отработки высокогазоносных месторождений угля возможности вентиляции как средства борьбы с метаном исчерпаны. В настоящее время дегазация угольных пластов и вмещающих пород является неотъемлемой частью технологии угледобычи для большинства шахт в России и за рубежом (удельный вес газовых шахт в нашей стране превышает 80 %). За рубежом на участках с дегазацией добывается более 36 % всей подземной добычи угля, в странах СНГ – более 60 %.

Дегазация – принудительное извлечение газа из угленосной толщи инженерными средствами и удаление его, минуя атмосферу горных выработок, с целью создания безопасных и здоровых условий труда и повышения на этой основе экономических показателей работы, а также получения газа. Объектами дегазации являются все источники газовой выделении в горные выработки: разрабатываемые пласты; вмещающие породы, включая сближенные пласты; выработанные пространства действующих и ранее отработанных лав.

Для обеспечения высокой производительности очистных забоев, соответствующей техническим возможностям современного выемочного оборудования (5000–8000 т/сут), необходимо снижение газоносности пластов до 8 м<sup>3</sup>/т. В условиях достигнутых глубин разработки для этого требуется обеспечивать эффективность дегазации на участках не менее 80–90 %, а в целом по шахте – не менее 50–60 %. В условиях комплексно-механизированных лав при погашении вентиляционных выработок за очистным забоем эффективность способов и средств дегазации неразгруженных пластов не превышает 35 %. При использовании дополнительно дегазации выработанного пространства с применением газоотсасывающих установок достигается эффективность 35–90 %. Хотя доля пластовой дегазации в решении задачи снижения средней газообильности участка сравнительно невелика, главное значение этого способа заключается в снижении концентрации метана в периоды пиковых возрастаний ее при работе добычных машин и для снижения выбросоопасности пластов.

Эффективность дегазации пластов зависит главным образом от газоотдачи пластов и времени дегазации. Опыт дегазации сближенных пластов свидетель-

ствуется о том, что основное количество метана (75–80 %) извлекается в зонах, разгруженных от горного давления в результате под- или надработки дегазируемого пласта.

В условиях постоянно увеличивающейся глубины отработки пластов эффективность их дегазации снижается. Эта тенденция характерна для всех угледобывающих бассейнов. Для эффективного снижения газовыделения из угольных пластов необходимо ощутимо уменьшить их газоносность, что требует значительных сроков дегазации (до 1–5 лет) или поиска путей активного воздействия на угленосную толщу для увеличения газопроницаемости пластов, т.е. заблаговременной подготовки месторождения к отработке.

Метод воздействия на угольный массив с целью повышения его проницаемости получил название направленного гидрорасчленения пласта. Он заключается в том, что в дегазируемый пласт через скважину, пробуренную с поверхности, нагнетают воду для создания полости заданной ориентации. Затем нагнетанием рабочего агента производят раскрытие систем естественной трещиноватости, присущих пластам. Для сохранения раскрытых трещин вместе с рабочим агентом вносят крепящий материал. В качестве рабочего агента могут использоваться азот, кислород, углекислый газ, воздух, вода, соляная кислота и ряд других веществ.

В сложных горно-геологических условиях этот способ может применяться с другими активными воздействиями на толщу – пневмогидровоздействием, пневмооттеснением, гидроимпульсным воздействием.

Заблаговременная дегазация угленосной толщи может являться основой для создания эффективных способов добычи метана из угольных пластов как в период подготовки месторождения к выемке, так и в период эксплуатации – при сохранении скважин в разгруженном горными работами массиве их можно использовать для дегазации выработанных пространств.

б. Под эндогенной пожарной опасностью понимается опасность, обусловленная самовозгоранием угля в результате его окисления кислородом воздуха. Самонагревание в скоплениях угля происходит отдельными, сравнительно небольшими очагами. Одновременно происходит рассеивание тепла вследствие теплоотдачи от более нагретых участков к менее нагретым. Причем интенсивность генерации тепла и теплоотдачи возрастает с повышением температуры. Следовательно, дальнейшее развитие очагов самовозгорания зависит от соотношения скоростей изменения тепловыделения и теплоотдачи – если темпы роста генерации тепла превышают темпы рассеивания, то происходит самовозгорание. Протекание процессов окисления углистого вещества в зоне обрушения характеризуется изменением содержания оксида и диоксида углерода (CO и CO<sub>2</sub>), что используется для оценки эндогенной пожароопасности.

Описание этих процессов осложняется тем, что в реальных условиях по мере самонагревания изменяется концентрация кислорода в газовой среде на контакте с углистым веществом, а также меняется механизм окисления, что ведет к скачкообразному изменению константы скорости сорбции кислорода. Меха-

низм теплоотдачи с ростом температуры пород также изменяется: возрастает роль конвективного переноса и излучения. Кроме того, на динамику температуры влияет влажность угля (обводненность пород).

Таким образом, условия самовозгорания в шахтах определяются целым рядом факторов. Поэтому современная теория самовозгорания материалов рассматривает самонагревание и самовозгорание как сложные явления, в которых кроме химического процесса окисления решающее значение имеют физические процессы массопереноса и теплоотдачи. Характер и интенсивность этих процессов в шахте складываются под влиянием всего комплекса горно-геологических и горнотехнических условий, воздействие которых определяет доступ кислорода (т.е. условия, обеспечивающие генерацию тепла) и отвода тепла, выделяющегося при окислении. Наиболее сильное влияние на эндогенную пожароопасность оказывают следующие факторы: природная склонность угля к самовозгоранию (химические свойства угля), угол падения и вынимаемая мощность пласта, наличие тектонических нарушений, физико-механические свойства вмещающих пород (прочность, слеживаемость, проницаемость), способ вскрытия и подготовки пласта, система разработки, способ и схема проветривания, депрессия шахты и участка.

Статистика эндогенных пожаров в угольных шахтах показывает, что свыше 60 % из них происходит в выработанных пространствах. Совершенно очевидно, что вопросы управления вентиляцией в условиях разработки пластов, опасных по самовозгоранию, не могут решаться без учета фактора пожароопасности. Пожароопасность выработанных пространств должна не только оцениваться в конкретном виде, но и, учитывая возможности регулирования параметров при оперативном управлении вентиляцией, уменьшаться с целью повышения общей безопасности работ.

Решающее влияние на развитие процесса самовозгорания угля на выемочных участках шахт оказывают утечки воздуха через выработанное пространство. Величина утечек определяет скорости фильтрации воздуха, т.е. условия доступа кислорода, а также распределение концентраций метана, вынос газов и тепла из выработанного пространства в прилегающие выработки. В этом плане существует определенное противоречие между мерами борьбы с газовой опасностью и самовозгоранием. Так, наиболее распространенной мерой борьбы с метаном средствами вентиляции является разбавление его путем увеличения расхода воздуха. Поэтому общий рост газообильности шахт приводит к необходимости увеличения общешахтных расходов воздуха и депрессий, что, в свою очередь, увеличивает утечки через выработанные пространства. Эндогенная пожароопасность угольных шахт так же, как и газовая, обусловлена природной способностью углей окисляться кислородом воздуха. Основными мерами профилактики и борьбы с самовозгоранием являются различные способы изоляции очагов, снижения доступа кислорода в зоны обрушения, т.е. все меры по снижению утечек воздуха через выработанные пространства.

Особенностью самонагрева угля в выработанном пространстве действующих забоев является постоянное изменение условий температурно-газового режима во времени и пространстве. В зоне обрушения на определенном расстоянии от очистного забоя уголь и вмещающие породы оказываются в определенной степени изолированными в тепловом и аэродинамическом отношении от окружающей среды, причем при изменении условий проветривания это равновесие может нарушаться. По мере подвигания очистного забоя и слеживания обрушенных пород зоны с соответствующими условиями перемещаются в пространстве. Поэтому одним из важнейших факторов, влияющих на процесс самовозгорания угля в выработанном пространстве, является скорость подвигания очистного забоя.

Применение различных способов управления газовой выделением из выработанного пространства приводит к изменению условий его проветривания и, следовательно, влияет на эндогенную пожароопасность. Оценка пожароопасности того или иного способа управления газовой выделением является весьма актуальной для газообильных шахт, так как большинство газообильных пластов склонно к самовозгоранию.

В процессе развития горных работ динамика пожароопасных зон определяется совокупностью горнотехнических (скорость подвигания очистного забоя, система разработки и схема вентиляции) и аэродинамических факторов (расход воздуха на участке, проницаемость выработанного пространства, структура скоростного поля потока утечек).

Возможность количественной оценки аэродинамических условий пожароопасности выработанных пространств приобретает особую важность с точки зрения комплексной профилактики газовой и пожарной опасности. Для газообильных шахт, как правило, режим проветривания определяется по газовому фактору, а снижение пожароопасности обеспечивается специальными мероприятиями. Наличие методов комплексной оценки влияния обоих факторов позволяло бы поддерживать максимально пожаробезопасные аэродинамические режимы.

### Список литературы к разделу 2.5

1. Аэрология горных предприятий / *К.З. Ушаков [и др.]*. – М.: Недра, 1987.
2. Рудничная вентиляция: справ. / под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1988.
3. *Лидин Г.Д.* Газообильность каменноугольных шахт СССР. – М.: Недра, 1987–1990.
4. *Мясников А.А., Рябченко А.С., Садчиков В.А.* Управление газовой выделением при разработке угольных пластов. – М.: Недра, 1987.
5. *Сергеев И.В., Бухны Д.И., Фитерман А.Е.* Теоретические и экспериментальные методы исследования газового состояния массива. – М.: Наука, 1988.

6. Соколов Э.М., Качурин Н.М. Углекислый газ в угольных шахтах. – М.: Недра, 1987.
7. Управление газовой выделением в угольных шахтах при ведении очистных работ / И.В. Сергеев [и др.]. – М.: Недра, 1992.
8. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: Недра, 1984.
9. Пучков Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1993.
10. Пучков Л.А., Каледина И.О. Динамика метана в выработанных пространствах шахт / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1995.
11. Васючков Ю.Ф. Физико-химические способы дегазации угольных пластов. – М.: Недра, 1986.
12. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. – М.: Недра, 1992.
13. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004.
14. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002.

## 2.6. Горная теплофизика

### 2.6.1. Основные положения и история развития

**Горная теплофизика – совокупность знаний о тепловых процессах и явлениях, развивающихся в горных породах, их массивах и горных выработках при освоении минеральных и других природных ресурсов земных недр.**

Горная теплофизика является составной частью горного недроведения в системе горных наук и имеет непосредственную связь с разделами физики (термодинамика, кинетическая теория, статистическая механика и др.), разделами геофизики (геотермия), геологическими и другими горными науками.

Поскольку теплофизика есть учение о переносе энергии и массы, явления теплопереноса выступают в качестве причин, содержания или следствий практически любых природных и техногенных процессов материального мира. Теплофизика и термодинамика представляют собой научный фундамент энергетики, определяют эффективность и надежность любых теплоэнергетических и теплотехнических систем, измерительных комплексов, транспортных средств, процессов металлургического производства, химической технологии, пищевой промышленности и строительства. Закономерности теплопереноса играют важную роль в агрофизике, гидрологии, физике атмосферы и метеорологии и особенно в мерзлотоведении, гляциологии, геотермии, вулканологии, минералогии и других науках о Земле.

Освоение всего комплекса природных ресурсов земных недр, относящееся к компетенции горных наук, связано с созданием и функционированием горных

природно-технологических систем: карьеров, шахт, рудников, промыслов, скважин и различных подземных сооружений. При огромном разнообразии характеристик такого рода систем условия развития в них процессов теплопереноса отличаются некоторыми общими особенностями. Важнейшей из них является нестационарный характер теплообмена элементов инженерных сооружений с неограниченным или полуограниченным породным массивом при различных, а нередко и переменных условиях на естественных или искусственных границах раздела сред и фронтах фазовых переходов. При этом структурная неоднородность породного массива, анизотропность физических свойств слагающих его горных пород, неизотермическая фильтрация в их порах и трещинах различных жидкостей и газов – все эти факторы резко усложняют проблему прогнозирования и управления процессами теплопереноса в соответствии с технологическими требованиями инженерных систем. Третья особенность заключается в том, что температурные поля в элементах таких систем и окружающем массиве формируются и непрерывно изменяются как результат сложного взаимодействия разных по природе источников энергии. С одной стороны, это техногенные теплотокы, вызванные диссипацией части подведенных к системе внешней работы и энергии, а также экзотермическими процессами конденсации, сорбции, гидратации, окисления и т.п. С другой стороны, как начальное распределение температур и их градиентов, так и изменение этих параметров во времени и пространстве в значительной, а часто и решающей мере обусловлены глубинным тепловым потоком внутриземной генерации.

В разных по назначению и параметрам природно-технологических или геотехнологических системах и различных их элементах управление процессами теплопереноса вызывает, сопровождается или обеспечивает такие теплофизические эффекты, как замораживание, охлаждение (извлечение теплоты), конденсация, кристаллизация, нагревание, оттаивание, плавление, испарение, сублимация, термические деформации, термоупругое напряжение, диссоциация, дегидратация, газификация, горение и их комбинации.

Развитие соответствующих положений теплофизики и решение насущных задач прогноза и регулирования процессов теплопереноса при добыче и переработке полезных ископаемых, подземном строительстве и других горных работах, связанных с освоением природных ресурсов недр, привело к формированию науки – горной теплофизики, методологические особенности, закономерности, проблемы которой и составляют содержание данного описания.

Создание в бывшем СССР горной теплофизики – крупное достижение отечественной науки, получившее широкое мировое признание. В деятельности Международного бюро по горной теплофизике (МБГТ) Всемирного горного конгресса наряду с Россией и Украиной, стоявших у истоков этой науки, активно участвуют специалисты Болгарии, Великобритании, Германии, Индии, США, Швеции, Японии – более 20 стран мира.

Еще в бронзовом веке огневое разрушение крепких пород служило главным средством облегчения ручных горных работ. Среди первых суждений о природе тепловых процессов в недрах и их значении для добычи полезных ископаемых можно назвать древнегреческие трактаты Плиния Старшего и Тита Лукреция, средневековые обобщения Георга Агриколы. Первое научное объяснение естественной тяги в горных выработках дал наш великий соотечественник М.В. Ломоносов в своей диссертации «О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном» (1744). Множество имен, работ, собраний и дат имеют отношение к рождению горной теплофизики. Однако планомерное и систематическое формирование ее информационного фонда началось в 30-е годы прошлого века по инициативе академика А.А. Скочинского, организовавшего наблюдения за тепловым режимом горных выработок в шахтах Донбасса, где на глубоких горизонтах повышенная температура рудничного воздуха уже создавала дискомфортные условия и снижала производительность труда. Разумеется, высказанные еще в начале века идеи Д.И. Менделеева о подземной газификации угля, К.Э. Циолковского и В.А. Обручева – об извлечении геотермальной энергии горячего породного массива, работы Г. Фраша по освоению подземной выплавки серы, а также борьба с самовозгоранием углей и сульфидных руд, известным еще со времен Плиния и Агриколы, стимулировали интерес к изучению процессов тепломассопереноса в горных породах и выработках. Еще в предвоенные годы в США, а затем и в СССР начались работы по термическому бурению пород (А.В. Бричкин). При строительстве Московского метрополитена широкое применение получило замораживание водоносных пород (Н.Г. Трупаков). При активной поддержке И.М. Губкина было начато внедрение тепловых методов добычи нефти, впервые проведен опыт создания внутрипластового движущегося очага горения, предложенного А.Б. Шейнманом. И все-таки практически наиболее сложной и насущной оставалась проблема борьбы с высокой температурой рудничного воздуха при неизбежном углублении горных работ. «Лимитирующее» значение температурного фактора было известно еще из мучительного опыта работ в горячих забоях при проходке Симплонского тоннеля. Этот печальный опыт способствовал повышению внимания специалистов к этой проблеме и появлению первых, еще очень несовершенных методов расчета температуры рудничного воздуха.

В послевоенные годы по предложению А.А. Скочинского был проведен широкий комплекс научно-исследовательских работ в глубоких шахтах Донецкого бассейна. Эти работы возглавил А.Н. Щербань. Исследования процессов теплообмена при вентиляции медно-колчеданных рудников Урала, опасных по эндогенным пожарам, получили отражение в первой докторской диссертации по этой тематике К.В. Кочнева, исследования закономерностей естественной тяги и методы расчета ее тепловой депрессии в шахтных стволах – в докторской работе и монографии А.Ф. Воропаева. Однако развитие теории рудничного теплообмена как основополагающей части горной теплофизи-

ки в первую очередь связано с многогранной деятельностью и именем А.Н. Щербаня.

Уже на первых этапах изучения теплового режима донецких шахт стала очевидной необходимость искусственного охлаждения воздуха и создания специального шахтного холодильного оборудования. Поэтому работы сосредоточились главным образом в двух организациях: Институте горного дела (ИГД) и Институте теплоэнергетики (ИТЭ) Академии наук Украины, а само научное направление получило в ту пору название горной теплотехники. После реорганизации ИТЭ в Институт технической теплофизики (ИТТФ) в нем объединились основные украинские участники решения проблемы, а Президиум Академии наук Украины организовал регулярное проведение научных семинаров по горной теплотехнике. В них принимали участие десятки исследователей из Украины, России, Грузии, Белоруссии и других республик. Эти научные семинары сыграли огромную роль в популяризации проблем тепломассопереноса в горных породах и выработках, в привлечении к решению этих сложных проблем научной молодежи и специалистов из десятков институтов, горных предприятий и ведомств. В 60-е годы прошлого века четко выделились три главные центра развивающейся научной школы горной теплофизики (более широкое название постепенно утвердилось в связи с быстрым расширением круга проблем, подчеркивая при всем их разнообразии единство научной базы).

В ИТТФ (А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, А.С. Цирульников, В.П. Черняк, В.Я. Журавленко, Ю.П. Добрянский, А.В. Шурчков) проводили основополагающие исследования по тепловому режиму глубоких шахт и кондиционированию рудничного воздуха. Позднее к основным изучаемым объектам добавились сверхглубокие скважины, разнообразные подземные сооружения и геотермальные системы. Этот институт, как уже отмечалось, был главным организатором научных семинаров, на его базе работает Международное бюро по горной теплофизике ВГК, председателем которого после А.Н. Щербаня стал В.П. Черняк.

Московский горный институт (А.П. Дмитриев, Л.С. Дербенев, И.Д. Насонов, С.А. Гончаров, Ю.И. Протасов и другие) был и остается основным центром развития термодинамики горных пород – термических методов бурения взрывных скважин, термообработки и сушки добытых полезных ископаемых. Важную роль сыграли ежегодные широкие научные конференции по проблемам физики горных пород, ставшие в МГИ (ныне – МГГУ – Московский государственный горный университет) хорошей традицией, а также организация по инициативе академика В.В. Ржевского подготовки горных инженеров-физиков.

В Ленинградском (ныне Санкт-Петербургском) горном институте (В.Б. Комаров, Ю.Д. Дядькин, Б.Б. Кудряшов, Ю.М. Мисник, Ю.В. Шувалов, Ю.М. Парийский, В.С. Литвиненко, В.А. Чистяков, С.Г. Гендлер и другие) получено решение комплекса проблем горной теплофизики для шахт и рудников Севера, включающего развитие теории рудничного теплообмена при сезонных колебаниях температуры воздуха и летнем оттаивании мерзлых пород, прогноз и регу-

лирование теплового режима тоннелей БАМ, бурящихся по мерзлым породам скважин, теоретические основы их проходки методом плавления пород и льда, СВЧ-разупрочнение и новые способы технологического оттаивания мерзлых пород на приисках, технология ледопородной закладки.

В 1970 году в ЛГИ организована крупная Проблемная лаборатория горной теплофизики (ПНИЛ ГТФ), работы которой получили широкое международное признание. В последние годы деятельность лаборатории сконцентрирована на проблемах геотермальной теплофизики и технологии освоения ресурсов геотермальной энергии горячих горных пород. На базе ПНИЛ ГТФ была организована учебная подготовка и выпущено 170 горных инженеров-теплофизиков. Важную роль сыграла проведенная в ЛГИ в 1973 году Первая Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам горной теплофизики, в которой приняли участие около 500 специалистов почти 100 организаций России, Украины и других республик Союза. В своем решении Конференция определила предмет, основные объекты, целевую задачу и методологические особенности горной теплофизики, ее взаимосвязи с другими научными дисциплинами и тем самым завершила становление новой науки.

На Второй Всесоюзной конференции по ГТФ отмечалось быстрое расширение проблематики и успешное развитие горно-теплофизических исследований примерно в 150 научных, учебных и проектных институтах СССР. Только за период 1973–1981 годов по результатам этих исследований было защищено 26 докторских и более 100 кандидатских диссертаций, опубликовано около 60 монографий и множество научных статей, на международных конгрессах и симпозиумах по этим проблемам сделано более 20 докладов.

#### 2.6.2. Роль процессов тепломассопереноса в освоении природных ресурсов недр

Природные ресурсы недр существенно различаются не только по своему назначению (минеральные, энергетические и т.д.), условиям распространения и воспроизводства, но и по своей доступности для использования. Эта доступность зависит не от вида и качества ресурсов, а почти целиком определяется свойствами ресурсной среды. Очевидно, что в сравнении с космосом, атмосферой или Мировым океаном земные недра представляют собой наиболее труднодоступную среду. Рекордная глубина Кольской сверхглубокой скважины достигает лишь около двух тысячных радиуса Земли.

При освоении любой ресурсной среды полное избирательное извлечение какого-то одного, например, наиболее ценного из ее ресурсов обычно оказывается невозможным. Из этого следует, что освоение любых ресурсов сопровождается не только перемещениями масс и затратами энергии, но и их потерями, «рассеиванием» вещества и диссипацией энергии в ресурсной среде. Независимо от вида и качества затраченной внешней работы и энергии их технологические превращения завершаются энергопотерями в среду в виде теплоты. Уро-

вень этих потерь зависит от эффективности методов и средств управления процессами теплопереноса. Таким образом, закономерности и методы теплофизики имеют прямое отношение к технологии освоения любых природных ресурсов, а горная теплофизика может и должна играть важную роль в развитии ресурсосберегающей технологии освоения земных недр. Их высокая плотность, «непрозрачность», неоднородность вещественного состава и сложность строения серьезно затрудняют управление процессами теплопереноса по сравнению с условиями других ресурсных сред.

Минеральные ресурсы были и будут главным природным богатством недр. Развитие горно-обогащительной технологии расширяет границы минеральных ресурсов главным образом за счет вовлечения в них ранее недоступных глубоких горизонтов и северных районов, а также месторождений с низким качеством сырья, т.е. в конечном счете с повышенной удельной энергоемкостью извлечения полезных компонентов. С рассматриваемых позиций можно сказать, что технический прогресс расширяет возможности эффективного управления процессами теплопереноса при высоких температурах породного массива на больших глубинах, при низких отрицательных температурах в зонах многолетнемерзлых пород и повышенных энергопотерях при росте отходов в добытой горной массе.

В шахтах и рудниках в ряде случаев высокая температура сильно осложняет горные работы не только на больших глубинах. Известно, например, что на полиметаллическом месторождении Эрма-река (Болгария), разрабатываемом в зоне геотермоаномалии, главные запасы в зонах оруденения на глубине около 1 км законсервированы, так как их отработка при температуре выше 100 °С без предварительного теплового дренажа горячего массива просто невозможна. Другой пример – нефтяные шахты Ярегского месторождения (Ухта), где нефтеносный пласт песчаника обрабатывается паром через скважины, пробуренные из подземных выработок. На их отдельных участках температура воздуха достигает 60–70 °С. Только мощный охлаждающий эффект от интенсивного испарения пота при весьма низкой относительной влажности воздуха спасает людей от перегрева, но в местах прогрева породных стенок паром до температуры 90 °С и выше необходима их теплоизоляция для защиты людей от теплоизлучения. В таких условиях управление процессами теплопереносов играет решающую роль не только в обеспечении безопасности и охране здоровья людей, но и в самой технологии разработки месторождений.

В шахтах и рудниках Севера, разрабатывающих угольные, рудные и россыпные месторождения в районах распространения многолетнемерзлых пород, занимающих большую часть территории России и четверть всей площади земной суши, горная теплофизика имеет существенно иные, но отнюдь не менее сложные и важные задачи. При отрицательной температуре пород и суровых климатических условиях Севера нормализация микроклимата горных выработок направлена на защиту людей от переохлаждения и простудных заболеваний.

На первый взгляд такая задача может быть решена намного проще и дешевле, чем борьба с высокими температурами, тем более, что от холода рабочий защищается прежде всего утепленной спецодеждой (при работе в мерзлых породах она необходима при любой температуре воздуха). Главная сложность управления тепловым режимом северных шахт и рудников связана с его многоцелевым назначением. Не только самочувствие людей, работающих в подземных выработках, но устойчивость последних и состояние крепи, интенсивность пылеобразования и запыленность воздуха, опасность образования наледей на почве и «шубы» (иней) на кровле и стенках выработок, оттаивания или сублимации льда, цементирующего трещиноватые скальные массивы и минеральные зерна рыхлых мерзлых пород, их прочность и другие физические свойства, направление действия естественной тяги, развитие морозобойных трещин, обмерзание вентиляторов, дверей и оборудования, туманообразование в околоствольных дворах, возможность защитного заземления электрооборудования и надежность противопожарных водопроводов, смерзание разрушенных пород в транспортных сосудах и магазинах – все эти условия и эффекты, определяющие безопасность и эффективность горных пород, зависят от среднего уровня, сезонных колебаний, направления изменений температуры воздуха и массообменных процессов.

Во избежание опасного прогрессирующего оттаивания мерзлых пород вокруг выработок в этих условиях допускается подогрев поступающего в них воздуха зимой до умеренных отрицательных температур. В глубоких северных рудниках (на рудниках Норильска – самых глубоких в России – горные выработки достигли 1300–1500 м) наряду с зимним подогревом поступающего в стволы наружного воздуха необходимо его охлаждение на глубоких горизонтах.

На россыпных шахтах приисков Якутии и Северо-Востока оттаивание мерзлых пород резко снижает устойчивость выработок и исключает возможность их нормальной эксплуатации. Поэтому используются специальные схемы проветривания, обеспечивающие постоянное сохранение отрицательной температуры в действующих выработках, и широко применяется отработка небольших шахтных полей за холодный период года.

В целом многофакторная задача управления процессами тепломассопереноса на северных шахтах и рудниках решается с учетом их разностороннего влияния на технологию подземной разработки месторождений.

Тепловые методы горной технологии приобретают все более важное значение в освоении минеральных ресурсов. В этих специальных методах горных работ теплофизические и термодинамические процессы представляют не сопутствующие явления или условия, а основу самой технологии.

Термические методы являются основной альтернативой взрывному способу разрушения крепких горных пород. Уже созданы достаточно эффективные технические средства и расширяется успешное практическое применение термомеханического бурения взрывных скважин, термических методов обработки раз-

рушенных пород, сушки концентрата после обогащения руд и т.д. Замораживание водоносных горных пород остается главным и наиболее эффективным специальным способом проходки шахтных стволов, тоннелей метрополитенов и любых других выработок в обводненных участках недр. Различные методы оттаивания мерзлых пород являются важной составной частью технологии подготовки и отработки дражных и бульдозерных полигонов на северных приисках. Теплофизические процессы играют определяющую роль почти во всех методах скважинной геотехнологии (подземная выплавка, газификация, подземное сжигание, прогрессивные тепловые метод нефти и т.д.). Во всех этих случаях управление процессами тепломассопереноса определяет направление развития и интенсивность самой технологии добычи соответствующих горных пород. Таким образом, как в традиционной технологии горных работ, так и в перспективных скважинных методах добычи ископаемых теплофизические процессы и методы их рационального регулирования во многом определяют безопасность и экономическую эффективность освоения минеральных ресурсов недр.

Другие помимо минеральных природные ресурсы недр при их освоении также предполагают необходимость сооружения объемных горных выработок или скважин и управления процессами тепломассопереноса в специальных горных работах и при функционировании созданных инженерных систем. Использование ресурсов подземного пространства практически всегда требует регулирования температурного режима естественных полостей, оставшихся от разработки месторождений, или специально пройденных горных выработок. Естественно, что закономерности процессов тепломассопереноса в таких выработках и окружающем их породном массиве весьма близки к шахтам и рудникам, а их особенности и требования к уровню температуры и интенсивности тепловых процессов зависят от специфики размещенных в них весьма разнообразных подземных объемов. Эти требования различны для подземных цехов и метрополитенов, подземных спортивных залов, кинотеатров, торговых центров и изотермических газохранилищ, подземных складов-холодильников и для захоронения тепловыделяющих отходов АЭС. Разумеется, разными будут и степень сложности, и методы управления процессами тепломассопереноса для перечисленных и иных типов подземных объектов. Можно подчеркнуть, что низкая теплопроводность горных пород, теплозащитные и теплоаккумулирующие эффекты массива, окружающего подземные объекты, являются важнейшим достоинством, обеспечивающим резкое сокращение энергозатрат на их функционирование по сравнению с размещением тех же объектов на поверхности.

Освоение возобновляемых водных ресурсов недр, пожалуй, в наименьшей мере связано с тепловыми процессами и эффектами. Правда, конвективный перенос тепла фильтрационными потоками подземных вод вызывает соответствующие возмущения геотемпературного поля. Поэтому температурный контроль успешно используется при охране водных ресурсов. Конечно, если рассматривать

водные ресурсы недр в системе с источниками их восполнения, т.е. атмосферными осадками и таянием ледников, то мы снова «погрузимся» в процессы тепло-массопереноса. Эти процессы определяют условия формирования и добычи термальных вод, которые, к сожалению, после энергетического использования лишь в отдельных случаях используются в системах водоснабжения.

Что касается практически неисчерпаемых по своему природному потенциалу геотермальных ресурсов, то не только их формирование, но и любой вариант технологии добычи геотермальной энергии представляет собой процесс тепло-массопереноса в фильтрационных каналах естественных или искусственных коллекторов и скважинах.

Если при освоении геотермальных ресурсов высокая температура означает высокое качество теплопродукции, то при дальнейшем экспериментальном изучении глубинного строения и сложных процессов геологической эволюции она становится одним из основных осложняющих негативных факторов.

### 2.6.3. Объекты, предмет и задачи горной теплофизики

**Объектом изучения в горной теплофизике являются** горные породы и их массивы с полостями, трещинами и движущимися по ним жидкостями и газами, рассматриваемые как термодинамические системы. Эти гомогенные и гетерогенные системы характеризуются интенсивными (давление, температура) и экстенсивными (объем, теплоемкость, масса) параметрами состояния. При воздействии на них различных источников энергии состояние таких систем определяется их внутренней энергией, произведенной внешней работой, выделенной или поглощенной теплотой фазовых переходов и химических реакций и параметрами тепло-массопереноса в самих системах и при их взаимодействии с окружающей средой.

**Предметом изучения в горной теплофизике являются** процессы генерирования, распространения, аккумуляции и преобразования в другие виды энергии теплоты естественных и искусственных источников, а также различные температурные эффекты и явления в горных породах и их массивах, в горных выработках, подземных сооружениях и скважинах при разработке месторождений полезных ископаемых и других работах, связанных с освоением природных ресурсов и использованием недр.

**Целевая задача горной теплофизики состоит** в прогнозировании тепловых эффектов и изменений термодинамических параметров состояния ее объектов при разного рода техногенных воздействиях с использованием полученной информации при управлении этими эффектами и изменениями для обеспечения безопасности соответствующих технологических процессов и их оптимизации по экономическим и экологическим критериям.

Методологические особенности горной теплофизики вытекают из ее прикладной направленности. Аппарат математической физики, термодинамики, математической статистики и теории подобия используется для создания возмож-

но более полной и корректной физической модели изучаемого процесса или явления. Не менее важным является и последующий этап – обоснованное упрощение этой модели с привлечением экспериментальных материалов, физического и численного моделирования применительно к поставленной технической задаче для получения количественного выражения закономерности в виде, пригодном для инженерного использования. Наконец, совершенно обязательной является оценка последствия такого упрощения, обоснование области применения полученных зависимостей и решений, их сопоставление с экспериментальными данными и известными ранее расчетными методами для установления условий их допустимого для практических целей применения.

Взаимосвязи с другими науками обусловлены характером объектов горной теплофизики, ее предмета и задач. Как и все науки о Земле, в том числе цикл горных наук, к которому она относится, горная теплофизика базируется прежде всего на геологической информации об изучаемых объектах. Вещественный состав и геологическое строение месторождений или иных участков недр, их гидрогеологические условия, поле гравитационно-тектонических напряжений, геотемпературное поле и газовый режим – от полноты и достоверности этой разносторонней исходной информации об объекте горно-теплофизических исследований зависит не только их конкретное содержание, но и достоверность полученных закономерностей или иных итоговых результатов.

Самым естественным образом горная теплофизика связана со всеми остальными горными породами. На этапе формирования исходной информации о геометрических и энергетических характеристиках объектов и обоснования конкретных задач изучения процессов тепломассопереноса в этих объектах, а также при упрощении их строгих физических моделей определенную роль играет сама технология разработки месторождений, бурения скважин и подземного строительства. При изучении тепловых процессов и явлений неизбежно обращение к информационному фонду физики горных пород, разрушения горных пород, рудничной аэрологии, подземной газодинамики, аэродинамики и горной геомеханики.

Особое значение и сложность имеют сопряженные термо-, гидро- и геомеханические задачи, в которых температура, давление и другие параметры обусловлены взаимодействием разных по природе процессов и, следовательно, могут быть определены лишь при совместном использовании расчетного аппарата разных горных наук. Примером могут служить условия геотермального гидро разрыва или условия захоронения радиоактивных отходов и функционирования подземных «саркофагов».

Можно отметить также, что при управлении процессами тепломассопереноса, изменением соответствующих технологических параметров и их системной оптимизации на основе методов экономико-математического моделирования теплофизические зависимости становятся частью моделей функционирования природно-технологических проблем. Это предъявляет к указанным

зависимостям дополнительные требования, обусловленные компьютерным методом реализации этих оптимизационных задач, а горная теплофизика «контактирует» здесь с горной экономикой, обосновывающей частные и глобальные критерии такой оптимизации.

Наконец, уместно подчеркнуть и совершенно очевидную связь – методы исследований и закономерности процессов теплопереноса в земных недрах, установленные в горной теплофизике, конечно же, опираются на принципы, методы и общие законы теплофизики.

#### 2.6.4. Приоритетные научные направления исследований в области горной теплофизики

Круг проблем горной теплофизики при всем их разнообразии ограничен двумя характерными особенностями. Во-первых, все они связаны с изучением процессов нестационарного тепло- и массообмена в полуограниченном неоднородном анизотропном многофазном породном массиве, подверженном техногенным воздействиям. Например, методика расчета и интенсификации стационарного процесса теплопередачи в системе охлаждения рудничного компрессора или шахтного калорифера, строго говоря, не относится к предмету горной теплофизики.

Во-вторых, естественные тепловые процессы в недрах, такие как извержение вулканов и гейзеров, развитие термокарстовых озер в Северной тундре и трещин в скалистых обрывах речных берегов, процессы гидротермального образования жильных месторождений, также не относятся к нашей науке, хотя закономерности горной теплофизики во многих случаях весьма полезны для углубленного изучения этих природных явлений. Можно сказать, что горная теплофизика начинается лишь там, где появляются техногенные воздействия на земные недра и их природные ресурсы, освоение которых и относится к компетенции горных наук, включая и горную теплофизику.

По характерным особенностям объектов изучения, целевому назначению исследований и роли изучаемых процессов в самой технологии освоения тех или иных ресурсов ее многочисленные проблемы были объединены в три основных научных направления:

- 1) теплофизика горных выработок;
- 2) горно-технологическая теплофизика;
- 3) геотермальная теплофизика.

**Теплофизика горных выработок** включает изучение закономерностей формирования и методы регулирования теплового режима любых открытых и подземных горных выработок, карьеров, шахт и рудников, тоннелей и других подземных и заглубленных сооружений, разведанных и технологических скважин, естественных и искусственных фильтрационных каналов, за исключением скважин и коллекторов при тепловых методах добычи нефти, скважинных методах геотехнологии и разработке геотермальных месторождений, когда процессы

тепломассопереноса нераздельно связаны с технологическими процессами или даже становятся самой технологией освоения соответствующих ресурсов. В остальных случаях регулирование теплового режима выработок не является частью самой технологии, но определяет ее надежность и безопасность.

Под тепловым режимом горной выработки понимают направление, темпы и пределы изменений во времени и по ее длине (а иногда и по сечению) температуры и влажности воздуха, а также температуры потока жидкости и окружающих выработку пород, процессов тепло- и массообмена и обусловленных ими тепловых эффектов.

**Горно-технологическая теплофизика** изучает закономерности и методы управления теплопереносом в самих технологических процессах в целях повышения ее интенсивности, безопасности, экологической и экономической эффективности освоения природных ресурсов недр. Это научное направление включает проблемы термического разупрочнения и разрушения горных пород, замораживания водоносных пород для повышения их несущей способности, устойчивости и гидроизоляции горных выработок, технологического оттаивания мерзлых пород для их дезинтеграции, паротепловой обработки нефтеносных пластов и частичного сжигания нефти для ее разогрева, снижения вязкости и более полного извлечения из недр, плавления, газификации, диссоциации и сжигания твердых горючих ископаемых при геотехнологических методах разработки месторождений, изоляции и подавления очагов самонагревания для предотвращения и локализации эндогенных пожаров и т.д. Все эти тепловые технологические процессы и управление их интенсивностью направлены на снижение общей энергоемкости, вовлечение в сферу использования труднодоступных природных ресурсов и более полное их извлечение из недр.

**Геотермальная теплофизика** рассматривает процессы теплопереноса в технологии освоения ресурсов геотермальной энергии. Обеспечивая освоение одного из важнейших природных ресурсов недр, эта технология по своему назначению представляет собой особую часть горной геотехнологии. По существу, технология добычи тепла Земли, т.е. извлечения из ее недр геотермальной энергии, сводится к использованию закономерностей процессов теплопереноса для повышения интенсивности этих процессов и предотвращения разубоживания энергоносителей – снижения концентрации в них геотермальной энергии (температуры и давления) и ее потерь в недрах.

Изучение закономерностей внутриземной теплогенерации, кондуктивного теплового потока и конвективного выноса тепла (геотермальные источники, гейзеры, фумаролы) относится к компетенции геотермии – разделу физики Земли. Геотермальная технология и соподчиненная с ее задачами геотермальная теплофизика начинаются с техногенных воздействий для стимулирования и управления этими естественными процессами. Можно уточнить: геотермальная теплофизика изучает закономерности возмущений квазистационарного естественного теплопереноса в земных недрах под влиянием техногенных воздействий на

геотермальные месторождения. Эти техногенные воздействия обычно направлены на интенсификацию фильтрационного теплообмена в естественных или искусственных геотермальных коллекторах и управление тепловым режимом геотермальных скважин. При этом тепловые процессы в коллекторах, а в первые годы и в скважинах, носят нестационарный характер.

### Список литературы к разделу 2.6

1. *Байбаков Н.К., Гарушев А.Р.* Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. – М.: Недра, 1981.
2. *Галкин А.Ф., Хохолов Ю.А.* Теплоаккумулирующие выработки. – Новосибирск: Наука, 1992.
3. *Гендлер С.Г.* Тепловой режим подземных сооружений. – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1987.
4. *Глузберг Е.И.* Теоретические основы прогноза и профилактики эндогенных пожаров. – М.: Недра, 1986.
5. *Дмитриев А.П., Гончаров С.А.* Термическое и комбинированное разрушение горных пород. – М.: Недра, 1987.
6. *Дмитриев А.П., Гончаров С.А.* Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1990.
7. *Дмитриев А.П., Гончаров С.А., Германович Л.Н.* Термическое разрушение горных пород. – М.: Недра, 1990.
8. *Дядькин Ю.Д.* Разработка геотермальных месторождений. – М.: Недра, 1989.
9. *Дядькин Ю.Д., Гендлер С.Г., Смирнова Н.Н.* Геотермальная теплофизика. – СПб.: Наука, 1993.
10. *Кравченко В.Т., Шувалов Ю.В.* Тепловой режим глубоких рудников. – М.: Недра, 1993.
11. *Кудряшов Б.Б., Пудовкин М.А.* Проблемы управления тепловым режимом скважины // Физические процессы горного производства. – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1982. – Вып. 12. – С. 24–31.
12. *Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М.* Бурение скважин в мерзлых породах. – М.: Недра, 1983.
13. *Мисник Ю.М.* Основы разупрочнения мерзлых пород СВЧ-полями. – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1982.
14. *Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н.* Технология строительства подземных сооружений. – М.: Недра, 1983.
15. *Павлов И.А., Гендлер С.Г., Смирнова Н.Н.* Теплообмен в технологических процессах при разработке месторождений полезных ископаемых. – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1989.
16. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии / *А.Н. Москалев [и др.]*. – Киев: Наукова думка, 1987.

17. Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами / под ред. Н.Г. Трупака. – М.: Недра, 1980.
18. Теплофизические аспекты освоения ресурсов недр / *В.Ж. Аренс [и др.]*. – Л.: Недра, 1988.
19. Теплофизические свойства горных пород / *В.В. Бабаев [и др.]*. – М.: Недра, 1987.
20. *Филлипов В.А.* Технология сушки и термоаэроклассификация углей. – М.: Недра, 1987.
21. *Шувалов Ю.В.* Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера (энергосберегающие технологии). – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ун-та, 1988.
22. *Щербань А.Н., Брайчева Н.А., Черняк В.П.* Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений. – Киев: Наукова думка, 1981.

### 3. ГОРНАЯ СИСТЕМОЛОГИЯ

В научных исследованиях, направленных на решение проблем комплексного освоения и сохранения недр, как и в случаях принятия решений в горной промышленности, методологической установкой принципиального значения является междисциплинарное взаимодействие.

Оно берет начало в феноменологическом характере горного производства, когда освоение не может быть осуществлено иначе, как во взаимодействии геологических объектов, техники и рабочего персонала. Это взаимодействие раскрывается в обусловленности горного производства различного рода ограничениями (ресурсными, технологическими, социальными, экологическими, информационными и другими) и распространяется на смежные с горными естественные и общественные науки: математические, физические, химические, геологические, экономические, социологические и др.

Междисциплинарность горного дела воплощает в себе современное миропонимание, которое состоит в признании системности (взаимосвязи, иерархической организации и целенаправленности развития) в строении недр, человеческой деятельности, направленной на их преобразование, геотехнологий, и, наконец, во взаимосвязи результатов освоения недр с природой и обществом.

Это обстоятельство делает необходимым введение нового понятия «геосистема». **Геосистема** – любая совокупность природных и искусственно созданных объектов, обладающая свойствами системы, создаваемая или используемая в целях освоения недр.

Геосистема охватывает представления о производственных, природно-технических, территориальных, социально-экономических и другого характера объектов освоения ресурсов недр, когда их изучение и управление ими осуществляется выявлением, анализом, обобщением и оценкой структуры систем, определением их свойств – инвариантных характеристик (целостности, надежности, живучести, унифицированности или уникальности, управляемости и др.), а также значения локальных изменений с позиции целого.

***Горная системология изучает закономерности развития и методы установления параметров геосистем, управления их функционированием и использованием в связи с последствиями освоения недр для общества и природы.***

Горная системология дополняет традиционное для горных наук пофакторное изучение горной действительности и решение локальных научных задач знанием законов и условий взаимодействия геосистем различного вида и уровня, что отвечает реальному процессу освоения недр.

Горная системология включает в себя следующие горные науки: теорию проектирования освоения недр, экономику освоения георесурсов, горную экологию и горную информатику.

### 3.1. Теория проектирования освоения недр

#### 3.1.1. Объект, цель и направления исследований теории проектирования освоения недр

**Теория проектирования освоения недр** как наука представляет собой область горной системологии в виде системы знаний о закономерностях взаимосвязи и методах установления параметров техногенного преобразования недр.

Рациональное освоение недр исходя из необходимости их постоянного эффективного функционирования требует глубокого и тщательного обоснования всех проектных решений по строительству, эксплуатации и реконструкции горнодобывающих предприятий. Проектирование определяет уровень развития технологии и техники как на ближайшую, так и, особенно в горном деле, дальнюю перспективу. От совершенства методов проектирования, их научной обоснованности зависят темпы научно-технического прогресса во всех областях, включая горную промышленность – базовую для развития общества в различных направлениях.

*Теория проектирования освоения недр как наука – это совокупность методов расчета и критериев принятия решений по конструированию и выбору параметров объектов, характеризующихся неопределенностью исходной информации, невозобновляемостью и неповторяемостью предметов труда, длительным временем функционирования и масштабностью объектов, значительным разрывом во времени принятия решений и их реализации, а также принципиальными трудностями изменения этих решений в процессе функционирования объектов.*

Исторически теория проектирования развивалась как совокупность расчетов по выбору параметров горных предприятий. Широкое применение расчетных методов началось только во второй половине XIX века и успешно продолжалось уже в XX веке. Если первоначально расчетные методы применялись главным образом для проектирования основных горных машин и механических установок, то широкая их разработка для горных предприятий в целом явилась признаком создания теории горного дела и перехода горного искусства в горную науку. При этом под расчетными методами со временем стали пониматься все те методы, которые дают количественные решения возникающих при проектировании задач с учетом влияющих факторов в их взаимной связи.

Расчетные методы применительно к проектированию освоения недр и строительству горных предприятий могут быть названы аналитическими в широком понимании этого термина. Статистический анализ, служащий для получения определенных зависимостей, может также рассматриваться как частный вид расчетного метода. Следует отметить, что суть аналитического метода в горных науках – не получение точечных решений в результате исследования на экстремум общих функций, а установление на базе факторного анализа области рациональных значений параметров различных физических и технико-

экономических подсистем, характеризующих отдельные стороны освоения недр. В таком широком понимании к расчетным аналитическим методам относится и часто ошибочно противопоставляемый им метод вариантов, издавна широко применяемый при проектировании горных предприятий.

*Объектом исследований теории проектирования являются собственно техногенные геосистемы – как совокупность технологических подсистем во взаимосвязи с природными геосистемами, предназначенные для добычи полезных ископаемых и освоения других георесурсов.*

В наиболее характерных для горного дела областях – вскрытие месторождений и системы разработки – применение аналитических методов развивалось в следующих основных направлениях.

1. Проведение горных выработок – теория бурения и взрывания, выбор параметров буровзрывных работ, определение сечения и скорости проходки горных выработок, выбор способов крепления горных выработок.

2. Вскрытие месторождений – определение глубины горных работ, производственной мощности и сроков существования горных предприятий, расчет размеров рудничных полей и порядок их подготовки и разработки, выбор типа шахт и расчет высоты этажей, экономические показатели работы горных предприятий и их зависимость от производственной мощности рудников.

3. Системы разработки – определение размеров выемочных полей и блоков, прочные размеры целиков, параметры очистных забоев, минимальная величина очистного пространства, соотношение объемов подготовительных и очистных работ, закладка выработанного пространства, выпуск руды, транспорт горной массы, коэффициент годового понижения, потери и разубоживание руды, выбор систем разработки.

Становление математических методов решения задач в указанных направлениях было начато Б.И. Бокием в 1902 году его работой «Выбор системы работ при разработке свиты пластов». Однако книга «Аналитический курс горного искусства» с подзаголовком «Проектирование рудников» вышла в свет только в 1929 году после смерти автора. В ней были изложены способы решения различных задач проектирования элементов горнодобывающего предприятия (шахты, рудника или группы шахт) с помощью методов математического моделирования и дифференциального исчисления, математической статистики и рассмотрения альтернативных вариантов качественных и количественных характеристик создаваемого объекта. основополагающие монографии, создавшие базу теории проектирования, принадлежат А.И. Стешенко (1930), А.С. Попову (1932), И.А. Кузнецову (1932), П.З. Звягину (1935), Л.Д. Шевякову (1935), М.И. Агошкову (1948), П.И. Городецкому (1949).

Развитие аналитического направления исследований в горном деле именно в России связано с масштабами и распространенностью месторождений полезных ископаемых и горного производства по сравнению с другими странами, в условиях, когда только научно обоснованный подход к выбору рациональных

параметров предприятий позволяет решать проблему возможного множества различных вариантов их строительства и эксплуатации.

***Цель теории проектирования освоения недр – создание новых и совершенствование существующих методов обоснования проектных решений по параметрам горных мероприятий.***

Исходя из цели проектные задачи по характеру, предопределяющему принципы их решения, делят на несколько типов: эвристические, исследовательские, технические, технико-экономические.

Эвристические задачи относятся к числу наиболее сложных. Это творческие задачи, возникающие в нестандартных, проблемных ситуациях, когда зачастую не имеется аналогов искомому решению, а найденное решение может обладать новизной на уровне изобретения. К этому же типу относятся задачи прогнозирования, которые решаются либо на основе экспертных оценок, если они сложны для формализации или не поддаются ей, либо формальными математическими методами.

Среди примеров эвристических (нестандартных), творческих решений задач в области подземной разработки руд можно назвать некоторые идеи, реализованные или намеченные к реализации:

- размещение подъемных установок и приемных бункеров скипового подъема под землей для предотвращения смерзания руды и стабилизации работы подъема; руда отсюда доставляется транспортом на обогатительную фабрику;

- подземная предконцентрация руд, заключающаяся в подземном частичном обогащении руд и размещении отделенных при этом пустых пород в выработанном пространстве и позволяющая сократить объем выдаваемой на поверхность продукции и соответственно снизить капитальные и эксплуатационные затраты на вскрытие, подъем, транспорт и обогащение на поверхности, уменьшить объемы отвалов пустых пород на поверхности и степень воздействия горнообогатительного производства на окружающую среду;

- использование глубоких скважин большого диаметра для подачи в подземные выработки закладки взрывчатых веществ, горючесмазочных материалов;

- вскрытие подземных горизонтов наклонными съездами со дна отработанных карьеров, сокращающее объем капиталовложений;

- отработка залежей сверхвысокими блоками с временным магазинированием отбитой руды и ее массовым выпуском под сухой закладкой, поступающей в камеру сверху и заполняющей ее по мере выпуска руды.

Исследовательские задачи состоят в установлении закономерностей, неизвестных ранее, или количественном описании ранее установленных. Эти исследования проводятся на предпроектных стадиях. Используются методы статистического анализа, опытно-промышленные эксперименты. Последние могут также использоваться и непосредственно в рабочем проектировании, когда в опытно-промышленных экспериментах уточняют устойчивые размеры камер и целиков,

параметры буровзрывных работ, устанавливая зависимость производительности горных машин от горнотехнических параметров. В таких случаях могут применяться и достаточно сложные методы исследований, включая физическое и математическое моделирование.

К техническим относится широкий спектр задач по расчету параметров технологического оборудования и процессов. Эти задачи решаются, как правило, с помощью расчетов по нормированным или специально разработанным методикам. Сюда относятся расчеты строительных конструкций, характеристик вентиляционных и электрических сетей, скипового и клетового подъемов, буровзрывных и погрузочно-транспортных работ.

Технико-экономические расчетные задачи типичны для горной части проектов рудников. Это объясняется многовариантностью и потому неочевидностью оптимальных решений и тем в большей мере, чем сложнее рассматриваемая технологическая схема. Как правило, это задачи оптимизационного характера (одно- или многокритериальные), и результаты их решения обычно неоднозначны. Это объясняется и недостаточной достоверностью исходных данных, столь характерной для горно-экономических задач вообще, и большим числом влияющих факторов (природных, технологических, экономических, социальных, экологических), воздействие которых зачастую противоречиво и далеко не всегда может получить точную количественную оценку. Поэтому для решения задач такого типа характерно, с одной стороны, использование элементов эвристических методов, а с другой стороны, прогнозный характер и динамизм такого рода задач, значительный элемент случайности и неопределенности в воздействии природных, организационных и других факторов на результаты функционирования проектируемой системы определяют использование для их решения сложных математических методов, некоторые из которых могут быть эффективно реализованы на базе современных быстродействующих ЭВМ с большой оперативной памятью.

### 3.1.2. Методы обоснования оптимальных параметров технологической системы в теории проектирования освоения недр

Теория проектирования освоения недр предполагает решение указанных задач в рамках обоснования оптимальных параметров техногенной геосистемы (технологической системы), предназначенной для добычи полезных ископаемых и освоения прочих ресурсов недр или отдельных месторождений в процессе их эксплуатации.

Такая технологическая система характеризуется типами, количеством и размерами горных предприятий, их производственной мощностью по основным и сопутствующим видам продукции, длительностью эксплуатации, способом разработки месторождения и схемно-планировочными решениями по горному хозяйству и инфраструктуре, технологиями и техническими средствами разработки залежей полезных ископаемых и освоения сопутствующих ресурсов недр, т.е. некоторым множеством качественных характеристик системы и коли-

чественными значениями параметров (проектных решений), от выбора которых зависит результативность и экономическая эффективность деятельности предприятий.

Следовательно, технологическая система – горное предприятие и тем более комплекс предприятий и производств – это большая, многомерная, развивающаяся во времени и пространстве динамическая система, характеризующаяся наличием внутренних связей между составляющими ее подсистемами и элементами. В свою очередь, эта система входит как составная часть в систему более высокого иерархического уровня – отрасль, предъявляющую к предприятию требования по количеству, качеству и стоимости (ценности) готовой продукции, определяемые спросом потребителей и конъюнктурой рынка.

В связи с этим теория проектирования рассматривается как теория оптимального проектирования, а основные положения и принципы теории и используемый аппарат исследований и принятия решений базируются на закономерностях как физического, так и экономического характера. При этом исследования осуществляются в следующих направлениях.

1. Методологическое – обоснование структуры системы и выбор методов ее моделирования и оптимизации; исследование взаимосвязей между подсистемами и элементами технологической системы (шахта, рудник, карьер, подземное пространство); обоснование рациональной размерности системы и методов оценки точности принимаемых решений.

2. Геотехнологическое – выбор способа разработки месторождения или его части; обоснование оптимальных технологий открытого, подземного и комбинированного способов разработки и области их применения на данном месторождении; разделение месторождения или части месторождения на шахтные, карьерные поля; обоснование производственной мощности горных предприятий, группы шахт, карьеров и последовательности строительства и ввода в эксплуатацию; обоснование технологических схем предприятий в целом, способа вскрытия и движения запасов в шахтном, карьерном поле; обоснование технологических схем и параметров вскрытия, подготовки и отработки отдельных пластов, залежей рудных тел.

3. Технико-экономическое – обоснование критерия оптимальности и установление зависимостей между элементами технологической системы и их стоимостными оценками в связи с научно-техническим прогрессом и развитием социально-экономических отношений в обществе; обоснование целесообразности, масштабов и технологий комплексного освоения ресурсов недр, видов осваиваемых георесурсов, количественных и качественных характеристик получаемой продукции.

Решить любую задачу, в том числе проектную, означает выбрать наилучший способ достижения поставленной цели.

Задача принятия решения возникает только тогда, когда существует цель, которой необходимо достичь, и когда существуют различные альтернативы дос-

тижения поставленной цели, а также факторы, ограничивающие выбор способа ее достижения.

Со способами достижения цели (альтернативами) при проектировании освоения недр связаны различные затраты и вероятности, которые не всегда точно могут быть определены, и потому решение приходится нередко принимать в обстановке недостаточной ясности и определенности.

Ограничивающие факторы могут быть экономического, технического и социального характера. К экономическим факторам относятся величины возможных капиталовложений, трудовых или иных ресурсов. К техническим факторам относятся, например, производительность горных машин, расход взрывчатых веществ на отбойку руды и породы, объем и габариты транспортирующего и погрузочного оборудования и т.п. К социальным факторам относятся квалификационный состав и образовательный ценз рабочих кадров, наличие или отсутствие жилищного фонда и системы культурно-бытового обслуживания и т.д.

В настоящее время в науке и технике неоспоримым становится системный подход к исследованию функционирования и к проектированию промышленных предприятий, которые рассматриваются как сложные системы, обладающие комплексом существенных связей и взаимосвязей собственных элементов и подсистем с элементами и подсистемами других сложных систем. Так, например, результаты деятельности горнодобывающего предприятия определяются как природными условиями месторождения и района его расположения, так и экономико-социальной характеристикой территориально-промышленного комплекса или отрасли.

Процесс проектирования, создания и эксплуатации сложных систем связан с необходимостью принятия множества решений как по системе в целом, так и по отдельным ее элементам и подсистемам. При этом все частные решения должны приниматься с позиций системного подхода. Если они не вполне обоснованы или же недостаточно учитывают интересы функционирования системы в целом, то это может привести к большим материальным или иным потерям.

По мере усложнения проектируемых систем усложняется и процесс принятия решений. В таких условиях принятие наилучшего, оптимального решения при проектировании освоения недр может гарантировать лишь использование научных методов, объединяемых теорией принятия решений.

Как научная дисциплина, оснащенная современным математическим аппаратом, теория принятия решений появилась не более 40–50 лет назад и базируется на использовании методов математического программирования, теории игр, теории статистических решений, исследования операций, системного анализа и т.п.

Именно теория проектирования освоения недр призвана соотносить решение горных задач с общими принципами теории принятия решений, с такими, например, как признаки деления задач на однокритериальные (скалярные) и многокритериальные (векторные), статические и динамические, детерминированные и стохастические.

Очевидно, что оптимальные проектные решения в полном смысле этого слова могут быть получены при совместной оптимизации искомых качественных и количественных параметров в единой модели. Однако из-за весьма значительной размерности такого рода задач в области освоения недр (числа искомых параметров и независимых переменных, ограничивающих условий и др.) комплексная оптимизация всех необходимых параметров практически невозможна, да и вряд ли целесообразна, в первую очередь из-за неточности и малой достоверности исходной информации и наших знаний о закономерностях протекания физических процессов в горном массиве или участка литосферы, включающего различные георесурсы.

Поэтому в теории проектирования освоения недр широко развиты итеративные подходы к принятию решений. Один из таких подходов заключается в разбиении большой системы на некоторые подсистемы с учетом минимума связей, локальной оптимизации их параметров и в последующем анализе системы в целом при варьировании параметров подсистем в областях, близких к локальным оптимумам.

Другой подход сводится к представлению задач комплексной оптимизации в виде двух задач – оптимизация качественных параметров (статическая задача), дающая некоторое ограниченное множество вариантов технологической схемы, и последующая оптимизация количественных параметров для отобранных лучших качественно отличных вариантов и их сопоставление с выбором оптимального (динамическая задача).

Однако наличие тесных, в том числе функциональных связей между достаточно большим числом параметров технологических схем предприятия в целом и схем разработки отдельных пластов, залежей, рудных тел делает целесообразным поиск эффективных методов комплексной оптимизации качественных и количественных параметров системы в единой модели при разумном ограничении ее структуры и числа исследуемых переменных.

Основой решений большинства горных проектных задач являются в современных условиях математические, в том числе экономико-математические модели.

Математической моделью в теории проектирования называют приближенное описание какого-либо класса явлений в освоении недр, выраженное в математической форме.

Исследование объектов и явлений с помощью математических моделей называют математическим моделированием. Математическое моделирование является мощным методом познания, управления и прогнозирования.

Математическая модель техногенной геосистемы отображает зависимость ее выходных в конечном счете оптимизируемых параметров от внутренних и внешних факторов. Такую математическую модель пока, как правило, удастся получить только для сравнительно простых объектов. Математическое описание процессов в проектируемой геосистеме может быть задано моделью в форме системы уравнений, включающих функции независимых переменных.

Создание модели предполагает прежде всего установление закономерностей связывающих ее элементов. Этот этап требует широких знаний факторов в изучаемой области и глубокого проникновения в их взаимосвязи.

При разработке методов проектирования и расчета параметров горных предприятий приходится оперировать огромным количеством разнородных данных, от точности, надежности и сопоставимости которых прямо зависит точность и надежность проектных решений, а следовательно, и результаты освоения и сохранения недр.

Исходные данные, которыми оперирует теория проектирования, можно разделить на три группы: геологоразведочные, геомеханические и геотехнологические, технико-экономические и социальные.

К первой группе относятся геологическая характеристика района и месторождения, данные о запасах месторождений, количестве, размерах и пространственном размещении рудных тел, руд различного качества и сортности; горно-техническая характеристика условий разработки, физико-механическая и технологическая характеристика руд и вмещающих пород; данные о наличии и характере тектонических нарушений; гидрогеологическая характеристика месторождения и горно-промышленного района и т.д.

Ко второй группе относятся результаты исследований в части, касающейся выбора параметров вскрытия месторождения, систем разработки, основных производственных процессов, комплексной их механизации и т.п., обогатимости руд, исследований грунтов в районе строительства; результаты разведки месторождений местных строительных материалов, источников питьевого и хозяйственного водоснабжения, условий сброса и очистки шахтных и сточных вод; результаты изысканий по размещению отвалов пустых пород, временного складирования бедных и непромышленных руд, хвостохранилищ обогатительных фабрик; результаты изысканий предполагаемых трасс подъездных путей, линий энергоснабжения, инженерных сетей и коммуникаций; данные о географических и метеорологических условиях в районе строительства.

К третьей группе относятся технические нормативные данные, намечаемые показатели производства и директивные данные, технико-экономические показатели по предприятиям-аналогам, технико-экономические показатели различных производственных процессов, нормы выработки и времени, разнообразные расходные нормативы, цены и тарифы на здания, сооружения, оборудование, конструкции, материалы, энергию, топливо и т.д.

К этой же группе относится значительный по объему массив данных социально-экономического характера: развитость инфраструктуры района, наличие и состав производительных сил и т.п.

Математическая модель, связывающая указанные выше многообразные исходные данные в различных вариантах, приводит к ряду задач, исследование которых требует применения соответствующего математического аппарата и вычислительных средств. На заключительном этапе производится согласование ре-

зультатов реализации модели с практическими или прогнозными данными в пределах точности наблюдений и измерений.

Модели должны обеспечивать универсальность, адекватность и точность расчетов.

Универсальность математической модели характеризуется полнотой отображения в модели свойств реального объекта, существенных для проектирования. Точность модели оценивается степенью совпадения параметров объекта, рассчитанных с ее помощью, со значениями параметров реального объекта. Для моделей широкой универсальности при множестве ситуаций, в которых может быть реализована данная модель, оценку точности модели проводят по результатам ее использования в стандартных ситуациях. Адекватность определяется способностью модели отображать заданные свойства объекта с погрешностью, не превышающей заданную.

Требование экономичности модели (расход вычислительных ресурсов) вступает в противоречие с ее точностью и универсальностью. Чтобы найти приемлемый компромисс, необходимо принимать рациональные пределы точности и универсальности моделей. Например, результаты моделирования размеров цепоиков или параметров буровзрывных работ следует считать, как правило, предварительными, подлежащими уточнению в процессе эксплуатации по мере уточнения исходных горно-геологических данных. Следовательно, в таких расчетах приемлема относительно невысокая точность (допустимое отклонение 5–10 %).

При проектировании горных объектов по способу представления их свойств наиболее экономичными считаются аналитические модели, представляющие собой явные выражения зависимостей выходных параметров от входящих и внутренних факторов. Однако разработка таких моделей (линейных или нелинейных, непрерывных или дискретных) возможна при принятии существенных ограничений и допущений, которые снижают точность и сужают область адекватности моделей.

Широко используются алгоритмические и имитационные модели, которые по характеру учета инерционности моделируемых процессов могут быть динамическими или статическими, а по степени определенности исходных данных – детерминированными или стохастическими.

### 3.1.3. Методы установления параметров техногенных геосистем в теории проектирования освоения недр

Теория проектирования освоения недр объединяет и развивает как традиционные, так и новые методы установления параметров и расчета конструкций отдельных горных объектов и техногенных геосистем в целом.

К традиционным относятся методы: вариантов, аналитический (математического моделирования), графический и графоаналитический, логических инженерных решений, обобщения и анализа передового опыта, аналогий, интерполя-

ции, экстраполяции и прогнозирования, а также лабораторных и промышленных экспериментов, натурального или физического моделирования. Традиционные методы по мере накопления опыта и углубления исследований уточняются, математизируются и могут быть частично использованы при автоматизированном проектировании.

К новым методам, получившим развитие в последнее время в связи с совершенствованием и расширением использования ЭВМ, относятся прежде всего методы математического программирования, являющиеся частью сравнительно молодой отрасли наук – исследования операций. Задачи математического программирования состоят в отыскании значений параметров, обеспечивающих экстремум целевой функции (критерия эффективности) при наличии ограничений, наложенных на ее аргументы. Задачи эти применяются для оптимизации решений, представляющих собой совокупность множества элементов решения (параметров), в условиях комплекса действующих ограничений.

Характерной особенностью задач математического программирования в условиях неопределенности является то, что они дают не одно определенное, а целую область приемлемых решений для окончательного эвристического выбора.

Метод вариантов как непосредственное технико-экономическое сравнение альтернатив до настоящего времени является одним из наиболее распространенных. Его широко используют для решения таких проектных задач, как выбор схемы, глубины первой очереди и шага вскрытия, выбор схемы подготовки, обоснование выбора системы разработки, оптимизация параметров очистных блоков (панелей) и основных производственных процессов очистной выемки, а также выбор местоположения промплощадки рудника, трассы подъездных путей и т.п.

Метод вариантов включает:

- тщательный отбор технически возможных в данных условиях вариантов проектного решения; отбор вариантов в две стадии: предварительно укрупненно оценивать максимальное число вариантов, из них отбирать минимальное, но достаточное число вариантов для детального технико-экономического сравнения;
- тщательный анализ и отбор исходных данных, от которых зависит точность решения проектной задачи;
- выбор наиболее достоверного критерия сравнения;
- учет при сравнении лишь существенных затрат и доходов;
- сопоставимость вариантов по фактору времени.

Метод вариантов является одним из наиболее достоверных и наглядных. Он позволяет сравнивать весьма сложные варианты геотехнологии, которые либо не поддаются аналитическому описанию, либо требуют создания чрезвычайно сложных и трудноанализируемых алгоритмов решения. Причем практически любое аналитическое описание сложного объекта подразумевает более или ме-

нее значительное его упрощение, тогда как метод вариантов позволяет избежать такого упрощения, учесть все значительные влияющие факторы. С его помощью можно количественно оценить некоторые факторы качественного характера, не поддающиеся непосредственной экономической оценке.

Выбор оптимального варианта определяется, как правило, не однозначно, а по области оптимальных решений принятого критерия сравнения. Ширина этой области характеризуется как основными технико-экономическими параметрами сравниваемых вариантов, так и точностью повариантных расчетов.

В практике проектирования принято считать экономически равноценными все варианты, разница в затратах между которыми не превышает 5–10 %. Однако некоторые специалисты считают, что при оценке общерудничных параметров равноценными следует считать такие варианты, по которым затраты, себестоимость или рентабельность отличаются не более чем на 1–2 %.

Недостатком метода вариантов является большая трудоемкость и громоздкость расчетов. Однако этот недостаток частично может быть нивелирован при использовании ЭВМ.

Область применения этого метода ограничивается возможностью или невозможностью получения достоверных исходных данных для расчетов, особенно при определении влияния тех или иных факторов на экономические показатели объекта проектирования. При использовании же прогнозных, вероятностных исходных данных точность результатов метода вариантов может быть сохранена только при соответствующем математическом обеспечении.

Аналитический метод (математическое моделирование) заключается в получении расчетных зависимостей теоретическим, эмпирическим путем или статистической обработкой практических данных и в нахождении искомой неизвестной величины подстановкой в формулу исходных значений известных параметров. Расчетная формула представляет собой в данном случае математическую модель проектируемого объекта, откуда и пошло второе название аналитического метода.

Установленные вышеописанными способами расчетные зависимости считаются непрерывными функциями, иногда условно. Эти зависимости могут быть различного характера, в том числе и экстремальными, обладающими минимумом и максимумом значения функции.

Метод заключается в однократной или многократной реализации модели и получении искомого единичного значения функции или серии таких значений, позволяющих исследовать характер влияния различных параметров на результат моделирования.

Аналитический метод получил достаточно широкое распространение благодаря своим достоинствам: малой трудоемкости и скорости решения задач в сравнении с методом вариантов; относительной простоте подготовки исходных данных, число которых ограничено; возможности исследования влияния различных факторов на результат проектирования путем многократной реализа-

ции математической модели; возможности использования для математического моделирования вычислительной техники, повышающей скорость и точность вычислений.

Однако получение аналитических зависимостей подразумевает неизбежное упрощение описываемых ими явлений или процессов, что обуславливает снижение точности получаемых результатов. Использование быстродействующих ЭВМ в принципе позволило усложнить математические модели и тем самым повысить точность описания моделируемых объектов. Но при этом необходимо помнить, что детальность модели должна соответствовать точности исходных данных.

Если исходные данные неточны, то бессмысленно разрабатывать весьма сложные математические модели и применять весьма тонкие и глубокие методы оптимизации их параметров, так как конечные результаты все равно будут приближительными и потребуют дальнейшего уточнения. Таковы, например, расчеты размеров камер и целиков, состава закладки и т.д.

Графический метод решения проектных задач путем графических построений обладает простотой и наглядностью. Он применяется, например, для определения границ зоны сдвижения на поверхности, построения контуров охранных целиков, поперечных сечений выработок и т.п. Чаще, однако, он используется совместно с аналитическим и тогда приобретает необходимую универсальность.

Графоаналитический метод широко применяется для исследования и оптимизации параметров процессов, не поддающихся сравнительно простому аналитическому описанию, а также в случаях, когда объект проектирования не может быть описан непрерывной функцией или рассматривается в динамической постановке.

Метод состоит в вычислении ряда значений искомого параметра при различных значениях влияющих факторов, обычно не менее четырех – пяти; нанесении полученных расчетных точек на график в соответствующей системе координат и их соединении плавной кривой, полагая условно искомую функцию непрерывной. При необходимости кривую можно описать аналитически с использованием строгих математических методов (например, метода наименьших квадратов), таким образом, будет получена эмпирическая зависимость.

Если полученная кривая имеет экстремальный характер, то ее исследуют на максимум-минимум с использованием графических построений. Как правило, при этом оптимальное значение влияющего фактора находится в диапазоне оптимальных значений. Ширина диапазона определяется характером и допустимой погрешностью в расчетах.

Графоаналитический метод соединяет в себе достоинства графического и аналитического методов – простоту, наглядность и возможность математического анализа влияния различных факторов на конечный результат. При этом исключается необходимость в сложном аналитическом описании исследуемых объектов до начала этих исследований. Однако для получения локальных зави-

симостей приходится вести повариантные расчеты со всеми присущими этому методу трудностями.

Графоаналитический метод применяется во многих оптимизационных расчетах, например, при обосновании производственной мощности рудника, выборе схем вскрытия, оптимизации высоты этажа, параметров доставки и буровзрывных работ и др.

Исследования в рамках теории проектирования отдельных горных объектов и техногенных геосистем, их взаимодействия с природными геосистемами привели к выявлению целого ряда закономерностей и установлению принципов решения задач освоения недр, ставших со временем «каноническими». Таковы методы обоснования основных геометрических и технико-экономических параметров горных предприятий. К их числу относятся такие важнейшие, как размеры и конфигурация шахтных полей и выемочных участков месторождений, горнотехнические возможности и интенсивность эксплуатации месторождений, системы разработки, производственная мощность горных предприятий.

Уже в 20-е годы прошлого века определилась ведущая роль экономики в проектировании горных предприятий. К этому времени сложилось представление, что для гарантии правильности и выгоды принимаемых решений технические и экономические вопросы должны рассматриваться совместно, во взаимосвязи. При этом важную роль приобрели так называемые стоимостные параметры, т.е. затраты на выполнение единицы различного вида работ: проведения, поддержания 1 м или 1 м<sup>3</sup> выработки, транспортирования 1 т полезного ископаемого на 1 км расстояния и т.д.

Стоимостные параметры представляются в виде формул, отражающих затраты на единицу работы или на работу (объект) в целом в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий ее выполнения. Качественные различия в характеристиках работ (для выработок – тип крепи и способ проведения, для транспорта – тип оборудования и т.д.) отражаются соответствующими отдельными зависимостями. Для построения зависимостей стоимостных параметров используются методы математической статистики, в частности регрессионного анализа, а в качестве исходной информации – натурные или проектные данные по видам работ.

Издавна сложилось представление о шахте как о большой технологической системе, состоящей из комплекса взаимосвязанных подсистем и элементов, принятие решений по каждому из которых требовало учета связей между ними и совместного влияния на общую экономическую оценку проекта.

Однако попытки объединения математических моделей отдельных элементов – видов работ и более крупных подсистем в единую комплексную экономико-математическую модель для совместного рассмотрения всех взаимосвязанных проектных решений привели к значительным сложностям, в первую очередь вычислительного характера.

Развитие электронно-вычислительной техники и внедрение ЭВМ новых поколений в практику научных исследований и проектных работ наряду с развитием математического программирования позволило подойти к решению задач оптимального проектирования с новых позиций, реализация которых определилась возможностью многократного повышения скорости расчетов и, следовательно, числа анализируемых проектных вариантов и их модификаций. Создались условия для повышения точности результатов расчетов и обоснованности методов проектирования.

В результате появились экономико-математические модели горных предприятий, позволяющие совместно оптимизировать комплекс проектных решений по обоснованию производственной мощности предприятия, размеров шахтного (карьерного) поля, схем вскрытия и подготовки месторождений, систем разработки, схем проветривания и т.д.

Разнообразие горно-геологических условий и типов проектируемых шахт привело к разработке множества экономико-математических моделей, отвечающих определенным целям – оптимизации проектных решений для специфических условий Донецкого, Криворожского, Кузнецкого и других угольных и рудных бассейнов.

Однако проблема создания универсальных комплексных экономико-математических моделей до сего времени не получила, а может быть, в силу природы описываемых явлений и не может получить должного решения.

Поэтому при разработке алгоритмов оптимизации моделей как для комплексных задач, так и для частных стали применяться и затем получили распространение методы математического программирования – линейного, нелинейного, динамического и др.

Использование этих методов в решении преимущественно научных задач создали основу становления и развития одного из прогрессивных направлений – системы автоматизированного проектирования шахт, рудников и карьеров (САПР).

В САПР как системе, учитывающей комплексность задачи оптимизации и взаимосвязанность параметров технологических схем, реализуется идея анализа задачи оптимального проектирования в многовариантной постановке. Целью создания организационно-технической системы САПР было повышение качества и обоснованности проектных решений, но не путем их автоматического получения, а реализации человеко-машинной системы. В этой системе человек-проектировщик по ходу выполнения расчетов по отдельным подсистемам имеет возможность вмешиваться в процесс и на различных этапах анализировать результаты с учетом взаимосвязей качественных и количественных параметров.

Наибольшее развитие получила автоматизация проектирования открытых разработок из-за их сравнительной технологической простоты. Уровень автоматизации проектирования в отдельных случаях достигает здесь 30–35 %. В проектировании подземной разработки уровень автоматизации существенно ниже, при-

чем в большей степени разработаны теоретические основы и ряд практических задач проектирования угольных шахт.

С точки зрения проектирования подземные рудники относятся к наиболее сложным объектам. Помимо недостаточной определенности исходных знаний о предмете разработки – месторождении, сложности и разнородности структуры предприятий, динамизма во времени и пространстве, малодоступного для контроля закрытого характера производства, подземные рудники как объекты проектирования характеризуются еще и многообразием возможных технических решений по каждому разделу проекта и всему их комплексу в целом. При этом очень часто преимущества одних проектных вариантов перед другими неочевидны, а порой и труднодоказуемы.

В таких условиях наиболее целесообразным в настоящее время оказывается многовариантное автоматизированное проектирование с поэтапной оптимизацией промежуточных решений на базе автоматически формируемых возможных в заданных условиях структур технологических схем и соответствующих им экономико-математических моделей с последующим выбором наилучшей из них по принятым критериям.

Проектам горных предприятий свойствен принципиальный и трудно преодолимый недостаток – создаваемые сегодня, в век ускоренного научно-технического прогресса, проекты реализуются в отдаленном будущем (для рудников нередко через 10 лет и более от момента начала проектирования). Значит, базируя проектные решения даже на самом передовом, современном опыте, нельзя рассчитывать, что предприятие, построенное по такому проекту, будет передовым и в будущем.

Сложность заключается еще в том, что рудники как производственная система обладают рядом статичных, инерционных элементов, плохо поддающихся корректировке, изменению в будущем (например, местоположение промплощадки, число и параметры вскрывающих выработок и т.д.). Причем такая корректировка в будущем связана, как правило, с большими затратами (проходка новых выработок и изменение сечения существующих при переходе рудника на новые виды оборудования и т.п.).

#### 3.1.4. Задачи прогнозирования в теории проектирования освоения недр

В проектировании к первоочередным задачам прогнозирования можно отнести:

- прогнозирование горно-геологических и горнотехнических характеристик месторождения, включая перспективы приращения запасов руды;
- выявление закономерностей и тенденций развития техники и технологии подземной добычи руд (средства механизации основных и вспомогательных процессов, системы разработки, схемы вскрытия и подготовки);

- прогнозирование количественных показателей производственных процессов и рудника в целом;
- социально-экономические прогнозы, касающиеся развития инфраструктуры района месторождения, обеспеченности материальными и энергетическими ресурсами, плотности, образовательного и материального уровня населения, производительности труда рабочих на различных стадиях производства и т.д.

Для прогнозирования технико-экономических показателей горного производства в теории проектирования используются статистические, экспертные методы прогнозирования и нормативное прогнозирование.

При статистическом прогнозировании анализируется ретроспективная информация о состоянии и поведении объекта исследований в прошлом, определяется тенденция (тренд) развития объекта и рассчитываются количественные характеристики его прогнозного состояния методом временных рядов с помощью регрессивных моделей или методом имитационного моделирования.

Достоверность статистического прогноза падает с увеличением глубины прогноза и тем больше, чем больше период упреждения.

Методы экспертных оценок основаны на использовании информации высококвалифицированных специалистов в той конкретной области, к которой относится исследуемый объект. Информация об объекте на основе субъективных оценок каждого из экспертов получается на основе методов математической статистики. Этот метод используется при отсутствии достаточно представительных статистических данных об объекте, он тем надежнее статистических методов прогнозирования, чем сложнее исследуемый объект, в чем сказываются преимущества эвристического характера решения задач освоения недр.

Нормативное прогнозирование – процесс нахождения оптимального пути (среди множества возможных) достижения определенной цели развития исследуемого объекта в будущем. Особенностью его является наличие главной генеральной цели. При этом прогнозируются не количественные показатели объекта, а пути их достижения в будущем при том или ином уровне развития технологии и техники освоения и сохранения недр.

В связи с длительными сроками службы горнодобывающих предприятий и большими сложностями объективного прогнозирования параметров техногенных геосистем на отдаленную перспективу возникла идея их поэтапного проектирования.

В период эксплуатации предприятия проявляются противоречия между однозначно установленными в проекте основными параметрами технологической схемы, с одной стороны, и изменениями горно-геологических условий и достижениями научно-технического прогресса – с другой. Вероятность таких противоречий тем выше, чем на более длительный срок эксплуатации предусмотрены те или иные параметры, отличающиеся высокой степенью статичности. К таким параметрам, как уже указывалось, в первую очередь, относятся схемы вскрытия и подготовки, система разработки, технологический комплекс на поверхности,

схемы подъема и транспорта. Устранение такого рода противоречий на практике реализуется путем реконструкции предприятия, как правило, не предусмотренной в проекте его строительства.

Меньшей статичностью обладают решения по выполнению технологических процессов очистных работ и проведения выработок. Поэтому противоречия между принятыми в проекте решениями по реализации процессов и изменениями условий их выполнения устраняются в большей части путем технического перевооружения элементов технологической схемы.

Анализ производственной деятельности горных предприятий показывает, что потребность в качественных изменениях характеристик (параметров) технологических схем возникает с определенной периодичностью. Например, для угольных шахт период рационального «долгожития» основных проектных решений, установленных на стадии проектирования строительства шахты, находится в пределах 15–25 лет.

Точность и надежность стоимостных параметров для горных и строительных работ в связи с научно-техническим прогрессом также ограничиваются периодом времени не более 15 лет. По истечении этого времени они должны быть скорректированы или разработаны вновь.

Таким образом, рациональная глубина прогнозирования «долгожития», а следовательно, и значений основных элементов технологических схем горных предприятий имеет предел, а утверждение о допустимости и эффективности принятия окончательных и неизменных характеристик шахты, рудника, карьера на весь срок службы приводит к несоответствию предприятия требованиям времени.

Представление об этапах в развитии шахты, рудника, карьера как о некоторой последовательности чередования характерных состояний горных работ и технологии является основой формирования системы проектирования в целом. Для этого весь ожидаемый срок существования предприятия, включая проектирование, строительство и эксплуатацию, разбивается на отдельные этапы. При этом в первый из них войдет время проектирования, строительства и некоторый период работы предприятия.

Особенность поэтапного метода проектирования горного предприятия заключается в возможности выбора наилучших сочетаний параметров технологической схемы, конкретных для первого или очередного и характеризующих наилучшее поведение системы в будущем с учетом возможности их видоизменения. Установленные для этапа параметры не являются неизменными и обязательными на весь срок существования предприятия. Обоснование параметров при поэтапном подходе производится в единстве технологических задач каждого отдельного этапа и развития предприятия в целом за весь срок службы. Обоснование и обновление параметров на каждом этапе позволяет осуществлять прогрессивные тенденции в развитии техники, технологии и организации горного производства, учитывать потребности в сырье и конъюнктуре рынка.

Четкий алгоритм реализации поэтапного подхода к проектированию горного предприятия зависит от геотехнологической стратегии освоения региона, функционального назначения и конкретности объекта, горно-геологических, экологических и социально-экономических условий.

В теории проектирования идея поэтапного подхода реализуется путем назначения и сопоставления вариантов технологической схемы предприятия, предусматривающих возможность его развития по мере освоения запасов георесурсов с последовательной реконструкцией и техническим перевооружением.

### 3.1.5. Критерии оптимальности в теории проектирования освоения недр

Центральным вопросом теории оптимального проектирования, особенно с использованием экономико-математического моделирования, является обоснование и выбор критерия оптимальности. К последнему в области технических решений, когда качество проекта с наибольшей полнотой оценивается технико-экономическими показателями объекта и их соответствием заданию на проектирование, предъявляются прежде всего требования технико-экономической емкости, чувствительности и универсальности.

В ходе становления теории проектирования освоения недр и развития экономической науки критерий оптимальности изменялся – от стоимости отдельных видов работ, себестоимости единицы продукции, суммарных капитальных и эксплуатационных затрат до более емких показателей – приведенные затраты на прибыль.

Основным достоинством показателя «приведенные затраты» является учет в соизмеримой форме текущих эксплуатационных затрат производства и капитальных вложений. Но он не учитывает такие важные в условиях рыночной экономики показатели, как ценность и качество георесурса. Кроме того, в силу своей затратной сущности он не может в полной мере служить целям производства – например, максимизации добычи, доходности на единицу затрат. Амортизационные отчисления в этом показателе выступают как эксплуатационные расходы, а не как источник накоплений данного предприятия. Приведение всех капитальных затрат к эксплуатационным посредством нормативного коэффициента эффективности не соответствует прогрессивным направлениям инвестиционной политики.

Некоторое улучшение в структуру критерия оптимальности вносит использование показателя «прибыль предприятия» при учете роли амортизационных отчислений и выделении из общей суммы капиталовложений затрат за счет собственного фонда накопления. В исследованиях применяется также динамический критерий абсолютной эффективности, в значительной мере устраняющий недостатки приведенных затрат.

Дальнейшее развитие экономической теории и практики принятия решений в условиях рыночной экономики привело к созданию нового критерия опти-

мальности – внутренняя ставка дохода (IRR). Величина этого показателя определяется путем итеративного решения уравнения, описывающего равенство дисконтированных доходов и расходов предприятия. Показатель IRR – это рыночная процентная ставка, являющаяся функцией величины потока наличности, изменяющегося во времени. При этой ставке проект окупается.

Показатель «внутренняя ставка дохода» используется как критерий относительной эффективности для крупных технологических решений с неравномерным распределением во времени затрат и дохода. Поэтому в силу своей сущности показатель IRR приемлем для оценки эффективности проектных решений по горнодобывающим предприятиям. Сравнение по этому показателю – это выбор наилучшего использования капитальных затрат, максимизирующего внутреннюю ставку дохода, с учетом убытков и денежных притоков в виде суммы амортизационных отчислений и прибыли за вычетом налогов и дополнительных выплат.

Критерий «внутренняя ставка дохода» пока еще не нашел широкого применения в отечественной практике проектирования горнодобывающих предприятий, но уже применяется в методических разработках по экономико-математическому моделированию технологических систем горного производства.

В отечественных горных науках исследования в области теории проектирования прошли несколько этапов от индивидуального проектирования горных предприятий по аналогиям до отраслевого проектирования (оптимизации) с применением различных методов математического программирования и современной вычислительной техники с созданием отдельных подсистем автоматизированного проектирования карьеров, угольных разрезов и подземных рудников.

Разработанные теоретические основы проектирования предприятий с открытой и подземной добычей полезных ископаемых с учетом их периодического технического переоснащения и принципы проектирования в региональном масштабе направлены на наиболее эффективное использование как минерально-сырьевых ресурсов, так и повышение эффективности научно-технического прогресса в горной промышленности.

За рубежом исследования в данной области знаний развивались главным образом в направлении совершенствования технико-экономического анализа и математического обеспечения оценки геологических запасов месторождений и масштабов индивидуального производства с позиций повышения надежности принимаемых решений и снижения так называемого риска помещения капитала в горнодобывающую промышленность.

Более широкое, чем известное ранее, содержание современных горных наук, их новые цели и задачи требуют развития фундаментальных разделов теории проектирования в направлении разработки принципов, методологии и совершенствования методов проектирования экологически безопасного (сбалансированного) освоения недр Земли с целенаправленным воссозданием их ресурсов в новом функциональном назначении. При этом все задачи должны быть реше-

ны с учетом изменений, происходящих в состоянии минерально-сырьевой базы, социально-экономической сфере использования, ресурсов недр, технологии и технике их освоения и сохранения.

Такой подход предполагает изначальное обоснование стратегии разработки месторождения как руководящей идеи и плана осуществления в пределах горных отводов во времени и пространстве открытых, подземных и комбинированных способов выемки георесурсов. Указанная стратегия проектирования должна соответствовать и новому смыслу самого горного предприятия как структуре, предназначенной не только для добычи полезных ископаемых, а в общем смысле для преобразования недр с обязательными экологическими, ресурсовоссоздающими и социально-экономическими функциями.

В теории проектирования можно надеяться на принципиально новые результаты, если основные методологические подходы будут построены не на ретроспективных данных, а главным образом на перспективных, прогнозируемых параметрах и показателях и в то же время на новом, более высоком качественном уровне использования во всей полноте геологической информации. Столь же существенным является и обоснование методов выбора параметров рудников с учетом вероятностного характера исходной информации, результатов расчетов и необходимой надежности принимаемых, решений.

Важнейшие принципы научного обоснования оптимальных параметров горных предприятий:

- предприятия приобретают многопрофильный характер вследствие множественности видов ресурсов недр и требований к управлению их качеством, состоянием и степенью использования;

- освоение недр не ограничивается исчерпанием какого-либо определенного ресурса;

- необходим мониторинг состояния природной среды на всех этапах преобразования недр с учетом возможности изменения во времени функционального назначения горного предприятия;

- параметры горных предприятий необходимо устанавливать на каждом из этапов освоения того или иного георесурса, эти параметры балансируются не только технологически и экономически, но и экологически.

***Основные научные направления в теории проектирования освоения недр:***

- обоснование стратегии освоения и сохранения недр, направлений и способов ее реализации;

- оптимизация производственной мощности и параметров технологических схем горных предприятий;

- развитие принципов проектирования и методов принятия решений при обосновании выбора технологии и техники освоения георесурсов;

- развитие теории и методов автоматизированного проектирования горных предприятий.

### Список литературы к разделу 3.1

1. Автоматизация проектирования подземных рудников / *Г.П. Данилина [и др.]*. – Алма-Ата: Наука, 1990.
2. Автоматизированное проектирование карьеров / *В.С. Хохряков [и др.]*. – М.: Недра, 1985.
3. *Арсентьев А.И., Холодняков Г.А.* Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений. – М.: Недра, 1994.
4. *Баранов Л.О.* Проектирование технологических схем и процессов подземной добычи руд. – М.: Недра, 1993.
5. *Воронюк А.С.* Рациональные схемы и параметры вскрытия рудных месторождений. – М.: Наука, 1993.
6. *Еремеев В.А.* Новые технические решения в проектах угольных шахт / ЦНИЭИуголь. – М., 1987.
7. *Каплунов Д.Р.* Развитие производственной мощности подземных рудников. – М.: Наука, 1989.
8. *Козаков Е.М.* Экономическое обоснование проектов горно-обогажительных предприятий. – М.: Недра, 1987.
9. *Кузнецов К.К., Еремеев В.М.* Эффективность освоения проектных показателей угольных шахт. – М.: Недра, 1985.
10. *Кумачев К.А., Майминд В.Я.* Проектирование железорудных карьеров. – М.: Недра, 1981.
11. *Митейко А.И.* Теория и практика создания систем автоматизированного проектирования промышленных предприятий: обзор, информ. / ЦНИЭИуголь. – М., 1984.
12. Совершенствование методов проектирования и планирования горных работ в карьере / *Н.В. Мельников [и др.]*; под ред. Н.В. Мельникова. – Л.: Наука, 1981.
13. *Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г.* Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. – М.: Недра, 1993.
14. *Хохряков В.С.* Проектирование карьеров. – М.: Недра, 1980.
15. *Шестаков В.А.* Проектирование горных предприятий / Моск. гос. горн. ун-т. – М., 1995.
16. *Яковлев В.Л.* Теория и практика выбора транспорта глубоких карьеров. – Новосибирск: Наука, 1989.
17. *Савич И.Н.* Выбор технологических решений при подземной разработке кимберлитовых месторождений. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 120 с.

## 3.2. Экономика освоения георесурсов

### 3.2.1. Основные положения и история развития экономики освоения георесурсов

Горно-экономическая наука – важная составная часть системы горных наук в целом. Вместе с тем, она может рассматриваться как один из специфичных «срезов общетеоретической экономической науки».

Объективно обусловленные роль и функции горно-экономической науки представляются двоякими.

На ранних стадиях освоения ресурсов недр задачей этой науки является определять ту часть выявленных геологами ресурсов недр, которая способна удовлетворить общественную потребность наиболее эффективным образом. На этих стадиях горно-экономическая наука задает точный прицел всему последующему проведению геологоразведочных, строительных и эксплуатационных работ, дает основу рациональному размещению производительных сил, освоению приоритетных регионов, созданию новых технологий и т.д.

При дальнейшем осуществлении всех этих работ экономические службы горных предприятий обеспечивают выбор наиболее эффективных технологических решений.

Первая из этих двух функций является стратегической, вторая – оперативно-тактической. Но больший объем нерешенных наукой задач относится сейчас к первой функции. Перенос акцентов в этом направлении будет означать растущие роль и рейтинг горно-экономической науки в общем комплексе горных наук.

Связь горно-экономической науки с теоретической экономической наукой в целом приобретает определенность с познанием своеобразия исходного объекта исследований этой науки – ресурсов недр. Это своеобразие заключается в том, что он является частью самой природной среды, создан ею по собственному замыслу, изначально помещен в глубины недр и невоспроизводим человеком. Данные отличия объекта исследований горно-экономической науки имеют фундаментальный характер и являются предметом специальных теоретических ее разделов. Общетеоретическая экономика либо не рассматривает многие из этих вопросов, либо касается их лишь поверхностно.

К числу специфических, но основополагающих разделов экономики освоения георесурсов относятся следующие:

- взаимодействие природной среды, технологии и экономики;
- эффективное использование невоспроизводимых ресурсов;
- комплексное использование природных и производственных ресурсов;
- формирование инфраструктур новых регионов промышленного развития;
- естественные монополии.

Ряд фундаментальных разделов общетеоретической экономики имеет в применении к горному делу столь сильную специфику, что требует принципиаль-

но иных решений. К ним могут быть отнесены проблемы горной ренты, инвестиционных рисков, экономической микродинамики, негативной концентрации, реструктуризации производства и др.

Начало регулярных и активных экономических исследований в горном деле в СССР можно отнести к первым послевоенным годам. Но действительное развитие они получили с созданием в бывшем ВУГИ (позднее – ИГД им. А.А. Скочинского) в 1953 году отдела горно-экономических исследований под руководством профессора А.К. Харченко. Именно с его именем в первую очередь было связано интенсивное расширение исследований в эти годы и последующие два с половиной десятилетия, привлечение в науку большого числа высококвалифицированных специалистов и молодежи, появление многих новых направлений исследований, установление плотных контактов ученых-экономистов угольной отрасли с производством.

В 1969 году на базе отдела был создан первый в горнодобывающей промышленности институт отраслевой экономики – ЦНИЭИуголь. Экономические исследования, проводившиеся в угольной промышленности, вскоре стали своего рода эталоном для развития аналогичной тематики в других горнодобывающих отраслях. Серьезные экономические подразделения были созданы в Московском и других горных институтах, ДонУГИ, Центрогипрошахте, Южгипрошахте, Днепрогипрошахте, ПНИУИ, ПечорНИУИ, КарНИУИ и многих других организациях. Москва сыграла важную начальную роль в подготовке научных кадров горно-экономической специальности. Значительно возросло участие производителей в развитии отраслевой экономической науки.

Наибольшее внимание в планах различных НИИ в течение длительного времени уделялось исследованиям экономических индикаторов, которые в то время считались основными показателями производительности труда, фондоотдачи, себестоимости и капиталоемкости горного производства. Работы раннего периода сосредоточивались на создании хорошей информационной базы, на выявлении и анализе основных факторов, формирующих величину этих показателей, на поисках возможностей их улучшения (А.К. Харченко, Г.Я. Бурштейн, И.Е. Атлас, Ю.С. Лир и другие) и разработке соответствующих методов пофакторного планирования (А.К. Харченко, Б.С. Найманов). Вопросам взаимосвязанного использования этих показателей в управлении производством и методологии долгосрочного их прогнозирования уделялось гораздо меньше внимания. Наибольшей популярностью у исследователей (Л.Л. Майзель) пользовались методы множественной регрессии.

Необходимо отметить, что в практике проектирования горнодобывающих предприятий вопрос о методах расчета проектной себестоимости угля и руд традиционно вызывал острые дискуссии среди специалистов. Трудными технологами – классиками горного дела еще в «докомпьютерные» годы были разработаны сложные многофакторные модели себестоимости предприятия как функции условий залегания месторождений полезных ископаемых и принимаемых технико-

технологических решений (Л.Д. Шевяков, П.З. Звягин и другие). Оптимальный комплекс этих решений предлагалось определять, приравнивая нулю первую производную данной функции. Практика проектирования не восприняла эти модели из-за их сложности и скачкообразного изменения искомых затрат при варьировании технических решений, т.е. скачкообразного характера исследуемых функций. Альтернативой являлись методы прямого расчета и сопоставления проектных вариантов.

Длительная дискуссия специалистов по этому вопросу потеряла свою основу при появлении компьютерной техники, объединившей оба метода расчетов себестоимости предприятия в единое целое в рамках систем автоматического проектирования (А.И. Митейко, А.М. Курносов и др.). Система этих моделей и поныне остается лучшим из когда-либо предложенных инструментов пофакторного расчета экономических показателей горного предприятия. Она пригодна не только для целей собственно проектирования, но применима и при планировании работы действующих шахт и карьеров. К сожалению, эта система не была должным образом оценена и востребована экономической практикой, позднее работы по ее совершенствованию были прекращены, и коллективы ее создателей распались.

Своеобразно развивались в отраслевых НИИ исследования в важной области ценообразования. В мировой экономической науке и практике цены играют ключевую роль инструмента, непосредственно определяющего прибыльность, т.е. эффективность любых хозяйственных и инвестиционных решений. В рыночной системе цены устанавливаются в значительной мере автоматически, в ходе сложных взаимодействий на рынке производителей и потребителей продукции. В конечном счете цена устанавливается на уровне, на котором производителю все еще выгодно продукцию производить, а потребителю – покупать ее на рынке. Цены рыночного равновесия отражают тонкий баланс интересов и возможностей обеих участвующих сторон – баланс спроса и предложения продукта. Теория равновесных цен является одним из ключевых разделов западной экономической науки. Государство должно вносить и обычно вносит свои коррективы в эту во многом авторегулирующуюся систему тогда, когда речь идет о долгосрочных интересах общества, которые рыночное ценообразование учесть в необходимой степени не может.

Ранее в плановой советской экономике цены в промышленности устанавливались только государством. В разные годы модель ценообразования менялась, но она никогда не имела ничего общего с рыночной теорией цены. Одной из центральных идей при этом было установление заниженных цен на минеральное сырье и топливо.

Горно-экономическая наука занималась ценообразованием много и долго, но, к сожалению, не имела права вырваться из жестких канонов плановой его модели в целом. Главные усилия ученых по причинам, не связанным с отраслевой наукой, были поневоле направлены на достижение целей более частных,

не менявших общей ситуации, по существу, прагматических. Исследования велись преимущественно в двух направлениях. С одной стороны, непрерывная, но малоуспешная аргументация в пользу повышения уровня цен на топливо и минеральное сырье, с другой стороны, детальные исследования факторов, определяющих потребительскую ценность этого сырья, и работы по соответствующей дифференциации цен в действующих преискурантах (Ю.С. Лир).

В целом действовавшая общая модель и система цен исключали возможность их использования в роли объективного показателя эффективности производства и экономической оценки ресурсов недр.

Классическая западная политэкономия исходит из теории трех факторов формирования стоимости. Согласно ей три основных фактора – затраты живого труда, вложенный капитал и природная среда производства (земля) – вносят каждый свой вклад в создание новых ценностей. Представляется, что получаемая при этом прибыль может быть распределена с соблюдением определенной пропорции между всеми тремя участниками производственного процесса – внесшим свой труд работником, владельцем вложенного капитала и землевладельцем.

В противовес такой концепции принятая в отечественной науке трудовая теория стоимости постулировала, что единственным создателем любой стоимости является живой труд, стоимости создаются трудом и только им.

Между тем технический прогресс порождал такие ситуации, решать которые с позиций трудовой теории стоимости оказывалось затруднительным. Наибольшие противоречия возникли, когда стала реально ощущаться ограниченность ряда потребляемых человеком природных ресурсов. Согласно данной теории складывалось представление, что минеральные ресурсы недр («in situ»), в частности, вообще не обладают какой-либо денежной ценностью, поскольку были созданы природой, а не живым трудом человека. Ресурс в его первоначальном виде в таком случае получает денежную оценку, считаясь как бы бесплатным даром природы.

Но доставшиеся бесплатно дары обычно не ценятся человеком. Бесплатными, например, ресурсами руд КМА или нефти Западной Сибири можно было пренебречь в интересах гидротехнического или другого строительства еще до начала промышленного освоения, якобы не причиняя экономике страны никакого денежного ущерба. Формальное следование этому теоретическому положению приводило на практике к тому, что денежная оценка, например, минеральных ресурсов недр не учитывалась государственной статистикой при определении величины национального богатства. Потери полезных ископаемых при добыче и переработке почти не отражались на экономике предприятия. Государство мирилось с тем, что 60–70 % нефтяных ресурсов ежегодно остаются неизвлеченными при эксплуатации нефтяных месторождений – ведь если потери «бесплатны», то любые затраты на радикальное изменение технологии нефтедобычи кажутся чрезмерно большими.

В данном случае наиболее «удачным выходом» оказалось введение в обиход новой дополнительной экономической категории «денежной ценности» (или «экономической оценки») минеральных ресурсов.

Однако при этом сохранялось другое препятствие на пути практических решений – некорректность централизованно устанавливаемой системы цен. В силу ряда сформировавшихся догм и традиций цены были резко занижены, негибки и в целом давали сильно искаженную картину действительности. Да к ним и не предъявлялось особых требований, так как государство компенсировало возникающие перекосы из других источников. Прогнозных расчетов на перспективу не делалось.

Многие горнодобывающие отрасли были нерентабельны в целом, в других убыточной была половина предприятий. Сюда направлялась сверхприбыль, производимая рентабельными предприятиями отрасли. В некоторых случаях даже самые лучшие из проектов новых горных предприятий оказывались нерентабельными, и решения об их строительстве принимались вопреки оценкам их эффективности.

В этих условиях показатели цены и прибыли теряли роль объективных показателей эффективности.

В этой ситуации учеными топливно-энергетического комплекса (М.И. Агошков, А.С. Астахов) было предложено ввести для экономической оценки минеральных ресурсов специальную параллельную ценам систему экономических показателей, получивших название замыкающих или предельно допустимых затрат, что, по нашему мнению, представляло крупное научное достижение.

Произошедшая либерализация цен на топливо и минеральное сырье означала начало движения к рыночной модели ценообразования (М.М. Гурен), к той самой модели, которую искусственно имитировали сторонники замыкающих затрат во времена, когда в прямом виде понятия рыночных цен в нашей экономике не существовало.

Большое место в проводившихся в отраслях исследованиях занимали теория эффективности и методология оценки инвестиционных и хозяйственных решений, относящаяся к числу наиболее важных и сложных проблем горной экономики (И.Е. Атлас, А.С. Астахов). Процедура принятия обоснованных хозяйственных и инвестиционных решений имеет своим кульминационным моментом расчет и сопоставление показателей экономической эффективности рассматриваемых проектных вариантов. Исследования в данной области имеют в горном деле давнюю традицию и прошли ряд этапов в своем развитии.

Существенная специфика горнодобывающих предприятий заключается в том, что рабочие места (забой) непрерывно перемещаются по рудному (шахтному) полю и в глубь недр, каждый раз попадая в новые горнотехнические условия, в целом усложняющиеся. Экономические показатели горного предприятия вследствие этого подвержены заметным, часто весьма сильным изменениям. Без

учета этого фундаментального фактора обоснованно управлять горным производством нельзя. В связи с этим названные теоретические исследования, направленные на решение проблем учета фактора времени при экономических обоснованиях инвестиционных и хозяйственных решений по освоению ресурсов недр, имели принципиальное значение. В отраслях топливно-энергетического комплекса были впервые созданы методология, критерии и модели разработки программ перспективного развития предприятий и регионов (А.С. Стугарев, Б.Ф. Братченко, А.С. Астахов, Г.С. Гольд, Э.И. Гойзман, А.А. Арбатов, Р.В. Орлов). Сложная специфика этой проблемы состояла в том, что отдельные поля и месторождения любого полезного ископаемого практически всегда индивидуальны по условиям залегания и качеству запасов, и экономически рациональное размещение предприятий является одной из главных предпосылок благополучной экономики отрасли на многие годы вперед.

Глубокому изучению были подвергнуты проблемы воспроизводства и обновления мощностей и технического потенциала горных предприятий и отраслей. Было обнаружено, что решения в этой области не вписываются в общепринятые теоретические каноны. Главную роль в проявлении такой специфики отраслей сыграла изменчивость горно-геологических условий работы горных предприятий.

Внимание отраслевых ученых было привлечено к разработке методологии установления экономически наиболее выгодной мощности предприятия. Мощность горного предприятия – один из основных факторов, влияющих на его экономику. Стандартные решения в данной области здесь невозможны ввиду существенных различий залегания месторождений полезных ископаемых. Специфика этой проблемы в том, что мощность и срок службы горного предприятия количественно взаимообусловлены. Были разработаны многочисленные модели совместной оптимизации этих двух параметров (П.З. Звягин, М.И. Агошков). Теоретически значимый успех принесло широкое, комплексное исследование проблемы установления экономически наиболее выгодной мощности горного предприятия. При этом удалось сочлениить и связать в единое целое теоретические положения четырех важных экономических теорий – воспроизводства, инновационных процессов, эффективности, а также интенсификации производства (А.С. Астахов, Н.И. Иванов, В.А. Харченко, А.М. Курносое).

Был исследован феномен падающей по мере эксплуатации мощности шахт, рудников и карьеров в связи с переводом горных работ на все большие глубины. Подобных явлений не знают предприятия других отраслей. Физическое сохранение предприятия при этом достигается в результате периодически осуществляемой реконструкции, которая в ряде случаев экономически эффективна даже тогда, когда не приводит к улучшению показателей предприятия.

В итоге выполненных исследований была предложена общая методология оценки эффективности реконструкции действующих предприятий, доказана неправомерность бытовавшего в то время тезиса об априорной предпочтительно-

сти реконструкции действующих предприятий в сравнении со строительством новых рудников, шахт и карьеров. Была разработана концептуальная модель формирования эффекта, приносимого реконструкцией, исследован механизм взаимодействий влияющих на нее факторов.

Важное научное направление исследований в течение длительного периода состояло в создании моделей внутришахтной интенсификации и концентрации горного производства, как решающих факторов его эффективности (П.З. Звягин, А.М. Курносов, А.И. Митейко).

Большое место в исследованиях многих коллективов занимали проблемы организации производства и труда (И.Е. Атлас, Е.М. Добрянская, И.Н. Каминский), нормирования (А.С. Гринер) и систем заработной платы и материального стимулирования (И.И. Каминский, Ю.Г. Грибин). Заметный вклад внесла отраслевая наука в энергично осуществлявшуюся в горных отраслях перестройку системы управления производством и компьютеризацию управления (Б.Ф. Братченко, Л.М. Климов, Р.М. Мигачев, М.А. Ревазов, В.А. Харченко, Ю.А. Чернегов).

Интенсивно разрабатывались и апробировались компьютерные модели и системы оптимального годового и перспективного планирования производства (А.С. Астахов, Э.И. Гойзман, Н.И. Иванов, Б.С. Найманов) на уровнях предприятия и производственного объединения. Вообще разработке и внедрению компьютерной технологии и экономико-математическому моделированию процессов управления специалисты горных отраслей уделяли значительное внимание уже в начале 60-х годов.

Крупные научные коллективы в ряде отраслей горнодобывающей промышленности традиционно заняты разработкой рациональных схем размещения и технического развития горнодобывающих отраслей (А.С. Стугарев, Г.С. Гольд, Р.В. Орлов).

В целом горно-экономическая наука изучала состояние и особенности производственных отношений и производительных сил отрасли, рассматривая горную промышленность лишь как сырьевую и топливную базу социалистического строительства. Наибольшие достижения горно-экономической науки рассматриваемого периода были связаны с оценкой минеральных ресурсов, экономическим обоснованием перспективных планов и прогнозов развития Министерства образования и науки Российской Федерации минерально-сырьевого комплекса, горнодобывающих отраслей промышленности и их сырьевой базы, совершенствованием методов собственно планирования (в том числе оптимального), механизма и методов принятия экономических решений.

Много сил было отдано решению вопросов экономики труда, развитию методологии планирования и учета себестоимости продукции и ценообразования. Традиционно важным считалось повышение эффективности капитальных вложений. На некоторых этапах акцент делался на решении вопросов научной организации труда и производства.

Развитие горно-экономической науки шло от узкой внутрипроизводственной ограниченной отраслевой спецификой тематики к постановке все более широких, в некоторых случаях межотраслевых, комплексных проблем. Со временем лучше стала осознаваться нерасторжимая связь горной экономики с природной средой деятельности горных предприятий. Нарастало понимание необходимости введения стоимостной оценки недр и невозможности решения этой проблемы на базе трудовой теории стоимости. Все более явной становилась невозможность создания действенных стимулов повышения эффективности труда и производства в условиях жестко централизованной системы планового управления.

Принципиальным шагом вперед стали разработка теоретических основ и начало реструктуризации угольной отрасли (Ю.Н. Малышев, Г.Л. Краснянский, А.Б. Яновский).

Охарактеризуем наиболее узкие места горно-экономической науки по тому ее состоянию, которое соответствует настоящему моменту.

Это состояние необходимо оценивать с двух принципиальных, но взаимосвязанных позиций. Сами же эти позиции обусловлены важнейшими обстоятельствами, определяющими будущее нашей страны.

В одной из этих позиций воплощается представление о роли ресурсов недр в экономике государства, в другой – очевидная необходимость изменения общественных (производственных) отношений и производительных сил в связи с переходом страны к рыночным условиям хозяйствования.

Исходя из первой позиции в той экономике, которая ранее именовалась социалистической (как, впрочем, и в мировой), недра ассоциировались с минеральными и топливно-энергетическими ресурсами. Такое положение сохраняется в основном и сейчас. Исчерпание недр, а также изменение их состояния связывалось только с наличием в них достаточного (в меру обеспеченности хозяйства) количества таких ресурсов. Оно (исчерпание) «дамокловым мечом» висит над обществом, сокращая национальное богатство любой страны, в том числе и России. Этот процесс всеобщий, он наблюдается во всех странах. Внутренняя и внешняя политика государств строится во многом с учетом собственного сокращающегося минерально-сырьевого потенциала.

Сейчас положение дел таково, что Россия, несмотря на ее огромную территорию, в значительной степени геологически неисследованную, и потенциальное богатство недр, не может считать себя в горно-экономическом смысле достаточно обеспеченной.

Представляется явно несоответствующей требованиям времени изученность проблемы сокращения богатства недр в его вещественно-натуральном, структурном и стоимостном аспектах с позиций национальной экономики.

Недра как средоточие многообразных, не только минерально-сырьевых, но и других георесурсов не осмыслены в экономическом плане. Сейчас не различаются, по сути, освоение георесурсов и освоение недр. Недра в том техногенно

измененном состоянии, которое сложилось в результате освоения какого-либо конкретного ресурса, не получают совокупной экономической оценки с учетом нового состояния оставшихся в них, преждевременно извлеченных или не полностью освоенных других георесурсов.

Исследование общих экономических закономерностей техногенной эволюции недр может составить научную основу для управления структурой горной промышленности и ее важнейшими характеристиками (ресурсоемкость, технический уровень, размещение и др.), формированием состава национального богатства и валового внутреннего продукта, а также другими ресурсами жизнеобеспечения общества.

Переход к рынку сделал необходимой либерализацию цен на основные виды сырья и топлива, что привело к очень значительному росту их стоимости для потребителя. Следствием этого стал недостаток средств на приобретение минерально-сырьевых товаров и резкое снижение платежеспособного спроса. Цепная реакция повышения цен произошла при этом и в отношении всех других видов товаров. Какие-либо более осторожные модели ценообразования с частичным государственным участием так и не были разработаны. Не было создано и необходимой методологии прогнозирования перспективных рыночных цен.

Все еще весьма слабо изучены теоретические основы отечественного управления (менеджмента). Западные школы современного управления персоналом, финансового управления, инновационной деятельности и теории принятия управленческих решений в отечественной литературе освещены крайне слабо, и эти знания не вошли пока в хозяйственную практику.

Одним из наименее разработанных разделов отечественной горно-экономической науки остается финансовый механизм и финансовый анализ дееспособности и устойчивости горных предприятий. Используемая ведущими странами во всем мире методология финансового анализа и контроля до сего времени считалась априорно малопримемой для нас и, по существу, была в нашей стране неизвестна.

Особенно неблагоприятно – в рамках всей экономической науки – сказывалось отсутствие общей научной теории переходных процессов, специфических методов их моделирования и целевого управления ими. Проработка и прогноз возможных ситуаций в этих нестандартных условиях хозяйствования отсутствовали, и главным «научным» компасом был метод проб и ошибок, а результаты осуществлявшихся решений оказывались, как правило, неожиданными.

### 3.2.2. Важнейшие современные проблемы экономики освоения георесурсов

Главным событием в экономической жизни страны за последние годы явился демонтаж старой системы централизованного планирования и обозначившееся начало перехода к рыночной системе хозяйствования. Переход к рынку неизбежно требует полной смены концептуальных основ экономической деятельно-

сти, ее направлений, методов и рабочих инструментов. Существенно изменяются при этом и сами функции управления экономикой горных предприятий по ее вертикали и горизонтали. Приоритетным общим направлением развития экономики освоения георесурсов в ближайшие годы будет разработка теории и механизма рыночной системы хозяйствования применительно к специфическим условиям горнодобывающих отраслей промышленности и предприятий.

Рассмотрим основные проблемы, требующие, по нашему мнению, наиболее обстоятельной разработки в рамках горно-экономической науки.

Исходным показателем рыночной экономики является, как известно, потребность в товарах. В отличие от плановой экономики рыночная система учитывает величину общественного спроса на товар, зависящего от его рыночной цены. Развитие научных основ рыночного ценообразования и прогнозирование платежеспособного потребительского спроса на минеральное сырье относятся к главным проблемам, ожидающим своего решения.

В тесной связи с ценообразованием находится проблема обоснования степени, направлений и форм государственного регулирования в области освоения недр и экономической поддержки горнодобывающих отраслей. В силу реально проявляющейся, уже рассматривавшейся нами горной специфики масштабы и формы такой поддержки в течение по крайней мере ряда лет могут быть весьма разнообразными и требуют активных научных усилий.

Необходимые в рамках рыночной экономики прогнозы также потребуют более детальной, чем ранее использовавшаяся, методологии, учитывающей факторы инвестиционного и коммерческого риска, неопределенности перспектив, конкуренции и изменения условий внешней среды. Крупным пробелом в экономической теории следует считать неразработанность методов генерирования альтернатив (в частности, стратегий прорывного типа).

Требуется научной разработки проблема конкурентной борьбы интересов участников инвестиционного процесса. Ждет решения ряд формально-методологических проблем, к числу которых можно было бы отнести, в частности, проблему неоднозначности оптимума при многокритериальной постановке инвестиционных задач; проблему согласования интересов участников хозяйственного и инвестиционного процессов; дальнейшее развитие методологии учета фактора времени и инфляционных процессов при экономическом обосновании инвестиционных проектов; разработку общей теории управления нестабильной экономикой горных предприятий в переходный период.

### 3.2.3. Перспективные направления исследований в экономике освоения георесурсов

В ближайшие несколько лет приоритет будет отдан следующим направлениям исследований.

Совершенствовать методологию долгосрочного прогнозирования потребностей рынка в минеральном сырье, топливе и других георесурсах в тесном

взаимодействии со специалистами макроэкономики. Важнейшее значение сохраняет разработка надежных конкретных прогнозов общественных потребностей в важнейших видах минерального сырья в тесной увязке с прогнозами научно-технического развития народного хозяйства.

Большая роль должна быть отведена работам методологической и практической направленности по системной экономической оценке базы земных недр в связи с дефицитом георесурсов, особенно минерально-сырьевых.

Необходимо сделать акцент на разработке стратегий развития горнодобывающих отраслей регионов и предприятий с учетом оценок риска и жизнестойкости последних в инвестиционных проектах. В рамках осуществления этих стратегий серьезным объектом исследований должен стать комплекс вопросов, в совокупности обеспечивающих разработку инвестиционной политики хозяйственных субъектов на всех уровнях управления.

Повышенное внимание в ближайшие годы должно по-прежнему уделяться разработке общетеоретических вопросов воспроизводства и реструктуризации производственного потенциала горнодобывающих отраслей.

Особую актуальность уже сейчас приобрела разработка теоретически обоснованных и практически приемлемых форм, направлений государственного регулирования и поддержки горнодобывающих предприятий различных организационно-правовых форм. Очевидно, что эта проблема должны решаться в двух направлениях. Первое из них предполагает разработку принципиальных позиций в вопросе о том, в какой мере допустимо (или необходимо) прямое вмешательство государства в дела горнодобывающих предприятий. Второе связано с обоснованием последовательности и темпов осуществления этой сложной перестройки, которая может быть последовательно реализована лишь в течение достаточно длительного периода времени. В целом же задача состоит в разработке эффективного механизма стабильных взаимодействий самостоятельных предприятий, действующих в рыночных условиях, с федеральными и региональными органами власти.

Необходимо заложить основы научных знаний в области факторного анализа экономического роста горного производства в России, характеризующегося рядом значительных особенностей состояния производственной базы, структуры фонда предприятий, воспроизводственной структуры инвестиций, размещения горных предприятий, их технического уровня, качества минерального сырья и др.

Серьезное внимание требуется уделить малоизученным, но острым вопросам создания эффективного механизма финансирования текущей и инвестиционной деятельности горных компаний.

Предстоит приложить значительные усилия к решению обширного комплекса методически сложных вопросов межотраслевого взаимодействия на стыках экономики и горного права. Многие принципиальные экономические вопросы не могут быть решены без серьезного продвижения вперед в области права.

Значительно отстают и требуют намного более серьезного, чем сейчас, научного обоснования системы продуманных и действенных законодательных актов, регламентирующих вопросы собственности на недра и их ресурсы, права и ответственность недропользователей, а также их юридические взаимоотношения друг с другом, органами власти различного уровня.

### Список литературы к разделу 3.2

1. *Астахов А.С.* Экономика разведки, добычи и переработки полезных ископаемых (геоэкономика). – М.: Недра, 1991.
2. *Астахов А.С.* Промышленное освоение минеральных ресурсов и принципы геоэкономики // Экономика и математические методы. – 1987. – Т. XXIII. – Вып. 1. – С. 47–60.
3. *Галиев Ж.К.* Экономика предприятия: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – 304 с.
4. *Галиев Ж.К., Галиева Н.В.* Информационные технологии в экономике горного предприятия: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 346 с.
5. *Петросов А.А.* Стратегическое планирование и прогнозирование: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – 464 с.
6. *Петросов А.А., Мангуш К.С.* Экономические риски горного производства: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 142 с.
7. *Гурен М.М.* Ценообразование и цены на продукцию горных предприятий: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 323 с.
8. *Пешкова М.Х.* Экономическая оценка горных проектов. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 422 с.
9. *Уткина С.И.* Экономика предприятия. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 262 с.
10. *Моссаковский Я.В.* Экономика горной промышленности: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 525 с.
11. *Моссаковский Я.В.* Экономическая оценка инвестиций в горной промышленности. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 323 с.

### 3.3. Горная экология

#### 3.3.1. Объект, предмет и задачи исследований горной экологии

**Горная экология** – наука (раздел горной системологии), изучающая закономерности взаимодействия техногенных экосистем с окружающей природной средой при освоении недр.

**Объект исследований** – взаимодействующие с окружающей природной средой техногенные геосистемы.

**Предмет исследований** – закономерности формирования в техногенных геосистемах экологической опасности; методы экологической оценки таких гео-

систем; методы и технические средства контроля их экологических параметров; научные положения создания геосистем, удовлетворяющих экологическим нормативам.

**Цель горной экологии** – разработка экологической теории геосистем как научной основы установления экологически безопасных параметров освоения недр.

Теоретическую основу горной экологии составляет учение о ноосфере, конкретизируемое применительно к техногенному преобразованию недр в процессе горного производства.

Современная практика исходит из необходимости предупреждения негативных экологических последствий, устранения и компенсации этих последствий и снижения их опасности. Предпринимаемые в этом направлении меры имеют теоретической основой концепцию рационального природопользования.

**Важнейшими направлениями деятельности** являются: создание экономического механизма, законодательного, инструктивно-методического и нормативного обеспечения, закладывающих основу стоимостной оценки природопользования и возмездное нарушение окружающей природной среды.

**Фундаментальная проблема горной экологии** состоит в таком установлении с учетом экологических оценок структуры и свойств геосистем как целостных природно-технических объектов, которое предполагает воссоздание на территории освоения недр нормативного качества природной среды.

Постановка основных задач горной экологии исходит из необходимости создания научных основ управления экологической ситуацией в горнопромышленных регионах.

**Приоритетные научные направления:**

- изучение комплексного освоения и сохранения недр как фактора экологической опасности;
- создание научных основ мониторинга изменений в окружающей природной среде под действием горного производства;
- идентификация экологических процессов, разработка критериев и методов инженерно-экологических и эколого-экономических оценок изменений в геосистемах;
- оптимизация экологических параметров геосистем;
- создание теории экологического риска и экологической устойчивости геосистем;
- совершенствование информационных технологий в управлении экологической безопасностью;
- развитие методологии экспертизы, сертификации и нормирования в обеспечении экологической безопасности.

Методологию горной экологии составляет системное единство методов организационно-правового, экономического, собственно экологического, информационного, технико-технологического и нормативно-методического управ-

ления процессом пользования недрами как ресурсом жизнедеятельности общества.

Горная экология связана преимущественно со следующими областями знаний: в горных науках – с горным недроведением, геотехнологией, обогащением полезных ископаемых, горной системологией в целом; в науках о Земле – с геоэкологией; в других естественных науках – с биологией, физиологией, географией; в общественных науках – с экономикой (природопользования), социологией.

### 3.3.2. Причины и основные тенденции изменения экологического состояния освоения недр

Отличительной чертой многих горнопромышленных регионов России является экологическая напряженность, которая оказывает значительное влияние на их экономическое и социальное развитие. Влияние двойственное: с одной стороны, экологические ограничения уже сейчас во многих случаях рассматриваются с позиций реальной уязвимости жизни как таковой, с другой стороны, эти ограничения стали явственно обозначать пределы обеспечения общества ресурсами недр.

Имеющийся научный задел недостаточен для достижения экологически безопасного состояния окружающей среды. Он не позволяет конструктивно понимать и оценивать характер и механизм формирования экологических последствий освоения недр, их развития и устранения. Имеющаяся нормативная база не соответствует составу воздействий на окружающую среду, увеличению масштабов и темпам нарастания их интенсивности, а также степени экологической опасности. Методическое и информационное обеспечение решения экологических проблем фрагментарно, а сами проблемы в своем большинстве имеют лишь локальную содержательную постановку, не соответствующую системному характеру экологических последствий. Не разработаны критерии оценки экологической безопасности освоения недр. Отсутствует геоэкологический мониторинг.

Помимо указанных, можно отметить значительное число других причин, в том числе частного порядка, однако по отношению ко всем им существует одна первопричина. Она состоит в отсутствии баланса между темпами, территориальными и георесурсными пропорциями, способами и технологиями освоения недр, с одной стороны, и возможностями природной среды к саморазвитию и сохранению состояния устойчивости, с другой. Причем отсутствие такого баланса наблюдается практически повсеместно и на всех масштабных уровнях: от глобального до частного, вплоть до бытового.

Отраслям промышленности, осваивающим недра, свойствен в целом экстенсивный характер экономического роста, когда потребление основных производственных ресурсов, включая и ресурсы недр, происходит по мере роста производства продукции или с опережением.

На протяжении десятилетий техническая модернизация освоения недр не имела успеха с точки зрения интенсивного развития складывающегося характера экономического роста. С наращиванием объемов добычи и переработки минерального сырья экстенсивное использование материальных и энергетических ресурсов привело в конечном счете к известным неблагоприятным экологическим последствиям, крупным изъятиям и нарушениям природных объектов и природных ресурсов. Так, за период 1976–1990 годов площадь земель России, нарушенных при добыче полезных ископаемых, прокладке магистральных трубопроводов, проведении геологоразведочных и других работ, составила 1,57 млн га, или в среднем за год порядка 100 тыс. га.

Изъятие земель и соответствующее этому преобразование водного баланса, изменение структуры ландшафтов, биоразнообразия и биологической продуктивности экосистем имеет, несомненно, большое экономическое значение на территориях с активным использованием плодородных почв, качественных лесов, лугов и других ценных в хозяйственном отношении возобновимых природных ресурсов. С экологической точки зрения должно вызывать озабоченность любое масштабное изменение состояния экосистем, ухудшающее качество природной среды на территории страны в целом.

Выбросы вредных веществ предприятиями энергетической промышленности и отраслей металлургии во многом обусловлены качеством минерального сырья, поступающего на сжигание или металлургический передел от предприятий, добывающих минеральное сырье.

Предприятия, осваивающие недра и непосредственно потребляющие и перерабатывающие их продукцию, отличаются значительными объемами сброса вредных веществ в водоемы.

Потребление электроэнергией свежей воды составляет примерно 2/3 от объема воды, потребляемой всей промышленностью России; нефтедобывающей промышленностью – 806,7 млн м<sup>3</sup>; черной и цветной металлургией – соответственно 1822 и 1196,2 млн м<sup>3</sup>.

Приняв во внимание поправку к годовым объемам выбросов в атмосферу и сбросов в водоемы загрязняющих веществ промышленностью, обусловленную снижением объемов производства, можно сделать вывод о практической неизменности положения дел с воздействием на окружающую природную среду, несмотря на положительные сдвиги, отмечающиеся по отдельным предприятиям.

Сохраняется небольшой доля восстанавливаемых земель в общих объемах нарушенных земель; в среднем по России она составляет величину порядка 34 %.

Влиятельным фактором, в значительной степени сказывающимся на экологическом состоянии территорий, на которых осваиваются недра, следует считать степень полноты и комплексности освоения и использования минерально-сырьевых ресурсов. Так, в стране теряется при добыче угля 11,5 %; хромовой руды – 25,3 %; свинцово-цинковой – 9,2 %; вольфрамомолибденовой – 14 %;

оловянной – 7 %; калийных солей – 61 %; апатитнефелиновой руды – 6,4 %; фосфоритовой руды – 6,7 %.

Потери полезных компонентов при переработке минерального сырья по большинству его видов также велики и составляют (в %): по железу – 26,1; меди – 18,3; цинку – 19,4; никелю – 13,9; вольфраму – 35; молибдену – 23,6; олову – 37,5; оксиду калия – 27; пятиокиси фосфора из апатитнефелиновой руды – 12; то же из фосфоритовой руды – 30,5; то же комплексных железных руд – 40,6.

Использование извлекаемых при добыче полезных ископаемых пустых пород в целом не может быть оценено как значительное. Так оно не превысило на предприятиях ОАО «Компания «Росуголь»» 47,6 %, а в горнорудной промышленности всего 17,2 %.

Весьма характерным для оценки положения дел с охраной недр и рациональным использованием минеральных ресурсов следует считать финансовое обеспечение. На эти цели выделяются капитальные вложения в объеме 36,7 млрд руб., что составляет в общем объеме вложений по данному направлению для России только 1,7 %.

Оценивая и сопоставляя, с одной стороны, масштабы экологических последствий деятельности предприятий, осваивающих недр, и объемы работ по требуемому экологическому оздоровлению горнопромышленных регионов, а с другой стороны, финансовые возможности, необходимо сделать вывод, что база реального управления природоохранной деятельностью в нашей стране явно недостаточна.

Эта ситуация усугубляется также совершенно недостаточным участием самих горных предприятий в решении экологических проблем. Так, доля затрат на выполнение собственно природоохранных работ в себестоимости продукции горных предприятий не превышает обычно нескольких процентов, как правило, не более 5 %.

Приведенные сведения получают более убедительную оценку, если принять во внимание важнейшие факторы экологической опасности, отличающие освоение недр. Среди них необходимо выделить прежде всего необратимость последствий воздействия горного производства на недр, когда полезные компоненты недр используются как предметы труда и при этом сами недр – как среда, в которой осуществляются горные работы. В этих случаях восстановить полностью естественное состояние недр и их природные свойства в районах освоения невозможно.

Остаточные необратимые изменения в природных объектах и природных ресурсах часто приобретают характер ограничений, инициирующих экстенсивный рост ресурсоемкости производства горной продукции, который, в свою очередь, обостряет экологические проблемы и расширяет зоны экологического неблагополучия.

Результаты анализа экологического состояния освоения недр в России требуют признать, что в стране фактически сложилась опасная, а в ряде районов ка-

катастрофическая по своим последствиям экологическая ситуация. Сохраняется тенденция продолжения интенсивного загрязнения окружающей природной среды различными отходами производства, нарушения ее состояния и экологически опасного истощения природных ресурсов. Фактор экологической безопасности превращается в фактор сохранения генетического фонда нашего общества и здоровья населения, обеспечения государственной безопасности, социальной и экономической стабильности.

Однако решение экологических проблем освоения недр сейчас состоит уже не только в том, чтобы выявить реакции различных представителей биоты на изменение физических условий существования, а понять эволюцию различных биологических существ и установить критические пределы техногенных воздействий на них, что само по себе чрезвычайно важно.

Экологические проблемы приобрели уже большое общественное значение, и их решение возможно лишь в форме организации экологически безопасной жизнедеятельности населения горнопромышленных регионов.

### 3.3.3. Развитие экологических знаний и становление горной экологии

Общее развитие экологических знаний идет в основном в следующем направлении: экология как биологическая наука все более приобретает черты науки биологизированной и при этом междисциплинарной. Такое развитие происходит не путем исключения как несостоятельных в научном отношении предшествующих стадий, а их насыщением новыми знаниями и переходом в иное, более высокое качество.

Так, Э. Геккель сформулировал в 1866 году представление об экологии как общей науке «об отношениях организмов к окружающей среде, куда мы относим в широком смысле все условия существования».

В работе приводится развернутая схема, иллюстрирующая современную глубокую дифференциацию экологических знаний, в отношении которой автор характеризует экологию в целом («большую» экологию) как «биологизированное (но не биология) научное направление... – область знаний о выживании, в том числе человека». В своих работах В.И. Осипов, говоря о геоэкологии, отмечает междисциплинарный характер этой науки, вбирающей в себя и «переплавляющей» знания многих отраслей – геологических, географических, горных наук, биологических и др.

За время, прошедшее со времени введения и первоначального объяснения понятия «экология», произошли большие изменения, касающиеся в первую очередь объектов экологического взаимодействия. Для нас важны те изменения, которые связаны прежде всего с представлением об экосистеме (А. Тенсли, 1935) как природном комплексе, образованном живыми организмами и средой обитания, связанными между собой обменом веществ и энергии.

Практически вся сфера материального производства служит цели ограждения человека от природной среды, от непосредственного с ней контакта.

Взаимодействие человек – природная среда раскрывается в реальности значительно более сложным образом, а именно: человек – искусственная среда – природная среда. Искусственная среда («вторая природа») как бы представляет человека, многократно увеличивая мощь и разнообразие его воздействия на естественную природу, повышая интенсивность преобразовательной деятельности.

Двойственная (биологическая и общественная) сущность человека предполагает двойственность в представлениях о факторах его уязвимости (или безопасности) со стороны изменяющейся в неблагоприятную сторону природной среды и недостаточной для существования при таких изменениях среды техногенной.

Объекты материального производства расширяют возможности человека как существа общественного, они же представляют собой компоненты среды его обитания как существа биологического, увеличивая роль негативных экологических последствий урбанизации.

Материально-техническая, экономическая и социальная значимость экологических взаимодействий с участием человека послужила отправным пунктом для дальнейшего развития экологии как науки, вследствие чего возникли новые понятия (одновременно и объекты изучения) – природно-техническая, социально-экологическая, природно-экологическая, природно-экономическая системы и др., названия которых сконструированы по такому же принципу.

Для горных наук оправданно обобщение их всех понятием «геосистема», изучение которой может быть актуальным с производственной, технической, экономической, географической, социальной и других, в том числе и экологической, точек зрения в связи с освоением недр.

Важность в том, что для экологического изучения геосистем, уже не может считаться достаточным изучение локальных экологических взаимодействий системных элементов со средой «по одному», механическая сумма полученных таким образом научных результатов недостаточна для получения необходимых научных знаний. Геосистемы в освоении недр – целенаправленно развивающиеся объекты; параметры любой из них распределены территориально и во времени. В геосистемах имеет значение многоуровневое строение. Они, помимо этого, большие системы (с точки зрения числа взаимодействующих объектов) и сложные (с точки зрения разнообразия их видов, параметров состояния объектов, режимов функционирования – процессов, выражающих их существование – каждой из них, многообразия взаимосвязей элементов и аспектов рассмотрения).

Поэтому каждый результат локального изучения должен получать системную оценку с учетом состояния и развития всей геосистемы.

Рассматривая под этим углом зрения накопленные экологические знания, имеющие наибольшее значение для горных наук, следует отнести современный

период развития горно-экологических знаний в целом ко времени первоначального накопления, обобщения, интерпретации научных фактов.

Постепенное признание того факта, что решение экологических проблем, по сути, состоит в организации безопасной в биологическом смысле жизнедеятельности, имеет следствием стремление включить в область экологического знания достижения чрезвычайно широкого ряда наук. Тем самым складывается положение, когда экология принимает на себя ответственность за объяснение и прогнозирование всех явлений, наблюдаемых во взаимодействии всего природного, биотического, с одной стороны, а с другой – искусственного, антропогенного, техногенного, инициируемого человеком.

В общественном сознании пока не утвердилась какая-либо конкретная общеприменимая экологическая концепция; обсуждаемые концепции (концепция «зеленых», научно-технического прогресса, защиты окружающей природной среды, умеренного развития экономики и др.) весьма общие, поэтому трудно представить сейчас механизм и последствия их реализации, а следовательно, их осуществимость и реальную научную и практическую ценность. В своей постановке некоторые концепции принципиально расходятся с установившимся общественным мировоззрением и «порядком вещей» и поэтому выглядят чрезмерно радикальными и несбыточными. Устойчивость развития, например, как предлагаемый императив не имеет должного объяснения с экологической точки зрения. Рациональное природопользование, гармонизированное взаимодействие с природной средой, умеренное развитие общества как экологические доктрины или концепции не содержат указаний на меру рациональности (гармоничности, умеренности) и способы достижения подобных состояний.

Для горной экологии в настоящее время характерны: богатая эмпирическими фактами история, фрагментарность знаний и отсутствие обобщающих теорий, существование проблем развития аналитических расчетных методов, а также инструментальной и информационной базы. Результаты исследований не сопровождаются, как правило, оценками достоверности и пока отсутствуют в целом возможности как для синтеза, обеспечивающего управление экологической ситуацией в районах освоения недр, так и для декомпозиции, дающей представление о приоритетных направлениях научного поиска и необходимых для подобного управления решениях.

Целостное научное понимание и устойчивые оценки экологических проявлений техногенных воздействий на природную среду складываются в большинстве случаев лишь на весьма высоких уровнях обобщения, чаще всего это глобальный уровень.

На уровне конкретной деятельности, в границах отдельных территорий, производств, населенных пунктов и соотносимых с ними природных объектов, природных ресурсов и экосистем, несмотря на значительные усилия ученых и имеющиеся результаты, до настоящего времени не обоснованы положения, достаточные для того, чтобы ввести деятельность по освоению недр в экологи-

чески осмысленные границы с пониманием всех экологически значимых сопутствующих освоению обстоятельств. Решение экологических проблем чаще всего сводится к достижению временных компромиссов в интересах горных предприятий и в ущерб состоянию природной среды.

Повышение экономических требований к горным предприятиям в связи с ухудшением экологической ситуации не сопрягается сегодня в должной мере с расширением возможностей использования экологических факторов в качестве инструментов экономической рыночной деятельности. В силу этого горные предприятия не выступают заинтересованными, активными участниками решения проблемы обеспечения экологической безопасности освоения недр.

Это положение дел находится в противоречии с тем фактом, что в горнодобывающих регионах окружающая среда приобрела значение влиятельного фактора производства, и это обстоятельство делает его учет в деятельности предприятия в той же степени обязательным и детальным, как и традиционных производственных факторов (запасов минерального сырья, инвестиций, трудовых ресурсов, техники, материалов и др.).

Освоение недр осуществляется с учетом широкого ряда требований геологоразведки, маркшейдерии, правил технической эксплуатации, безопасности труда и охраны недр, планирования производства, проектирования, экономики и т.д.

При освоении недр экологическая безопасность может быть достигнута лишь в том случае, если предприятия будут на деле являться и «несущей конструкцией», и одновременно «реализующим механизмом» в деле оздоровления экологической обстановки. Через предприятия приводится в действие механизм охраны окружающей среды, и только они реально могут выступать гарантами обеспечения экологической безопасности.

Обоснование природоохранных мероприятий предполагает их выбор, исходя из критерия минимума экологических издержек. Этот минимум достигается при таком варианте мероприятий, который обеспечивает максимум предотвращенного экономического ущерба от экологических нарушений над требуемыми для этого природоохранными затратами.

#### 3.3.4. Новые идеи и категории горной экологии

Дальнейшее развитие горной экологии, осуществляемое с системных позиций, требует выдвижения новых идей. Плодотворная работа может быть начата с творческого осмысления и развития таких категорий горных наук, как ресурсы недр (георесурсы), недр, комплексное освоение недр.

Рациональное научное ядро, содержащееся в этих категориях, откуда горная экология может воспринять необходимые импульсы развития, заключается в следующем.

Все ресурсы недр, понимаемые как потенциально полезные для общества в текущем времени, а также в ближайшем и отдаленном будущем аномалии

в свойствах горных пород и горных массивов, генетически взаимосвязаны; эта природная взаимосвязь предполагает при освоении недр взаимосвязь технологическую, за которой следует взаимосвязь экологическая.

Потребность общества в ресурсах недр со временем в целом неизменно возрастает и становится все более разнообразной, поэтому нельзя допустить, чтобы результатом пользования недрами стал перевод одного участка недр за другим в состояние, исключающее в дальнейшем возможность обращения к ним по причине их исчерпания, т.е. отсутствия каких-либо полезных свойств, поскольку к полезному следует отнести и такое свойство недр, как их способность собственной субстанцией, обладающей сложнейшей вещественно-энергетической структурой, поддерживать в каждом из своих участков баланс всех тех частей природных геосфер, которые составляют собственно биосферу.

Извлечение из недр одних георесурсов, изменение их качества в связи с потребностью общества неизбежно приводит к изменению других георесурсов и состояния недр в целом на территории освоения. Это порождает свойственную каждому случаю экологическую обстановку. Соблюдение экологических требований при освоении недр достижимо в том случае, если будут сохранены возможности для того, чтобы за счет естественных восстановительных сил или искусственным образом поддержать требуемый с экологической точки зрения баланс биосферных составляющих как условия существования и устойчивого развития экосистем.

Излагаемые далее новые идеи горной экологии, следующие логике этих положений, имеют единый смысловой стержень, а именно единство недр–горные технологии–экологическое состояние территории освоения недр.

1. Исследования показывают, что решение экологических проблем состоит не столько в активизации работы по обоснованию и реализации дополнительных мер, направленных на охрану окружающей среды, и во всемерном понуждении к этому предприятий, сколько в создании механизма экологического управления самим производством при освоении недр.

Горное производство реализуется сейчас как результат управления производственными ресурсами: минерально-сырьевыми, финансовыми, материально-техническими, трудовыми, энергетическими.

Общим для них всех свойством является то, что наличие каждого ресурса – совершенно необходимое условие для осуществления производства, а имеющиеся количество и качество ресурса определяют технологию, интенсивность и эффективность освоения недр.

Владение и распоряжение производственными ресурсами со стороны предприятия обеспечено развитой системой законодательных положений, подзаконных актов, экономических и других видов нормативов, ведомственных и более низкого уровня инструкций, руководств, правил и иных документов.

Структура горного предприятия предполагает индивидуальное (для каждого производственного ресурса) и сводное управление их запасами (количес-

вом), состоянием, качеством, эффективностью использования и другими параметрами. Это достигается соответствующими каждому ресурсу видами обеспечения производственной деятельности: для минерально-сырьевого – геологическим и маркшейдерским; для финансового – экономическим, в том числе бухгалтерским; для трудового – экономическим и обеспечением охраны и безопасности труда; для материально-технического – техническим обеспечением и т.д.

В организационной структуре управления предприятием предусмотрены службы главного геолога, главного маркшейдера, главного энергетика, главного механика, главного бухгалтера и т.д. По всем этим направлениям управление осуществляется в строгом соответствии с разрабатываемыми детальными регламентами.

Итак, управление горным предприятием исходит из необходимости соразмерного управления основными производственными ресурсами, поскольку именно они являются источниками различных ограничений и основой для повышения эффективности производственной деятельности.

Говорить о таком управлении имеет смысл только в том случае, если окружающую природную среду признать за своеобразный, особый, но все же производственный ресурс. Основания для этого имеются достаточные, поскольку в горнодобывающих регионах с развитием промышленности и соответственно с возрастанием нагрузки на среду она приобретает все признаки именно такого ресурса:

- особенности и состояние природной среды в обязательном порядке учитываются в технологических и производственных параметрах освоения недр;
- затраты на выполнение экологических требований в полном объеме влияют на экономику производства;
- здоровье и работоспособность трудящихся зависят от качества природной среды, и их нарушения в связи с изменениями в среде имеют очевидные производственные последствия.

Требования к охране природных объектов во многом определяют порядок, интенсивность освоения недр и технологические схемы работ.

Но в данном случае управление таким специфическим производственным ресурсом, как окружающая природная среда, должно стать составной частью системы управления всеми другими производственными ресурсами.

К сожалению, сделать это сейчас в должной мере невозможно по причине практически полного отсутствия необходимого регламента. Его создание зависит, в свою очередь, от результатов исследования освоения недр, осуществляемого различными целостными объектами – геосистемами.

2. Выбор природоохранного мероприятия, предполагающий в принципиальном плане отыскание оптимума, что может быть выполнено и на основе экономико-математического моделирования, не в полной мере учитывает сложный и динамично изменяющийся производственный контекст и временную динамику.

Обеспечение экологической безопасности фактически представляет собой процесс управления параметрами с целью их минимизации, т.е. для сведения всех колебаний в пределы некоторой окрестности точки, характеризующей исходное состояние системы горное предприятие–окружающая среда.

Это должно быть обеспечено технически и организационно, в этом состоит производственный аспект управления экологической ситуацией.

С математической точки зрения задача подобного управления может быть сведена к оценке устойчивости движения системы горное производство–окружающая природная среда. Выход системы за пределы заданной окрестности исходной точки означает ее переход в неустойчивое состояние с эколого-экономической точки зрения, что требует введения управляющих воздействий, достаточных для возвращения системы в состояние устойчивости.

3. Если продолжать следовать традиционным путем, то природоохранная деятельность должна иметь своим конечным результатом сооружение некоего «саркофага», возводимого над горным предприятием и состоящего по преимуществу из технических средств и сооружений, в прямом смысле имеющих средозащитное назначение и отделяющих экологически грязное производство от природной среды, сохраняемой в идеале в неприкосновенности.

Такая экологическая политика выглядит утопией по многим причинам, хотя бы потому, что основные и наиболее опасные экологические последствия освоения недр имеют неустрашимый и необратимый характер.

Экологическое управление освоением недр должно содержать в своей основе установление экологически безопасных характеристик горного производства, при этом необходимо достигнуть экологической сбалансированности параметров горных предприятий и освоения недр в целом.

Во многом решение этой проблемы связано с получением возможности управлять составом, количеством и свойствами того, что мы сейчас именуем отходами производства.

Понятие отходов сформировалось из-за противопоставления товарного продукта тому, что уже не может быть таковым при переработке данного исходного сырья.

Недра – средоточие очень широкого ряда георесурсов весьма разнообразного назначения: металлургического, сельскохозяйственного, энергетического, водохозяйственного, оборонного, бальнеологического, научного, культурно-эстетического, а с учетом важной природоорганизующей функции недр – также рекреационного, климатологического, курортологического значения. С недрами связывается во многих случаях решение вопросов обеспечения безопасности при размещении некоторых видов производств и эффективного использования такого ресурса, как территория.

Все георесурсы регионального местонахождения взаимосвязаны генетически, а их освоение – технологически и экологически.

Поэтому получение товарного продукта из одного георесурса сопровождается часто неуправляемыми изменениями состояния, качества, количества других сопряженных с ним ресурсов недр и природных ресурсов в целом. Это выражается в нарушении целостности массивов горных пород, изменении гидрологического режима района освоения, видоизменении географического и геохимического ландшафтов. Становятся другими климатические характеристики района, поверхность Земли заполняется складываемыми горными породами, не предназначенными изначально для использования и т.д.

Фактически следствием узко сфокусированного освоения недр, что является сейчас типичным, становится преждевременное извлечение, нарушение природного качества, некомплексное использование многих георесурсов. Техногенно измененные, они представляют собой, по сути, ресурсы вторичного использования. Это подземные выработки, в которых возможно размещение опасных отходов, складирование различных материальных ценностей, строительство производственных и других объектов; отвалы и хвостохранилища – как источник минерального сырья для жилищного, дорожного строительства или иных областей использования в будущем или как площади под строительство, сельскохозяйственное или иное обустройство; деформированные участки земной поверхности – в качестве площадей под бытовой и строительный мусор. К ресурсам вторичного использования следует причислить в целом те ресурсы недр, доступ к которым оказался закрытым вследствие предшествующей производственной деятельности или качество которых существенно ухудшилось.

Многие подобные ресурсы по своему происхождению являются преждевременно или неполностью освоенными ресурсами, спрос на которые отложен.

Они во многих случаях могут обладать ценностью, но лишь тогда, когда будут соответствующим образом рекультивированы: подземные выработки целевым образом переоборудованы, деформированные горные массивы укреплены, отвалы и хвостохранилища сформированы с учетом возможного использования и свойств материала (физико-механических, агротехнических, геомеханических и др.), гидрологические режимы подземных вод и гидрографическая сеть преобразованы исходя из экологических требований и нужд населения и т.д.

Это уже находит применение при формировании складов забалансовых руд и промпродуктов, селективном складировании пустых пород с учетом их агротехнических свойств, формировании экологически сбалансированных техногенных ландшафтов. Однако необходимое экологическое управление освоением недр должно предполагать управление воздействием на все ресурсы недр и другие природные ресурсы, вовлекаемые в производственный процесс и техногенно изменяемые с приданием им новых потребительских свойств, т.е. их рекультивации.

4. Товарные продукты и рекультивированные георесурсы, спрос на которые временно отложен, должны рассматриваться как материальные ценности – объекты рыночных отношений.

Возможность для горных предприятий стать активными участниками рыночных отношений по поводу рекультивированных георесурсов – техногенно измененных ресурсов недр с искусственно приданными им новыми полезными качествами – это реальная экономическая основа оздоровления экологической обстановки в районах освоения недр.

Научный подход к созданию основы для регулирования подобных экономических отношений может быть в принципиальных чертах следующим.

Окружающая среда, как уже отмечалось выше, приобрела отличительные признаки фактора производства, ограничивая его развитие, когда качество среды опускается до некоторого критического уровня.

Соблюдение норматива качества требует затрат. На рынке, формирующем в стране или регионе среднеобщественные условия производства определенного товарного продукта освоения недр, которые включают в себя и условия для обеспечения необходимой экологической обстановки, за счет разницы в затратах по причине территориальной дифференциации качества природной среды при эксплуатации недр может быть получена дополнительная прибыль. Эта дополнительная прибыль, получаемая на территориях средних и лучших по качеству природной среды, выступает как основа дифференциальной экологической ренты.

Следовательно, дифференциальная рента по экологическому фактору появляется в том случае, если имеется различие в затратах на обеспечение требуемого качества окружающей среды на лучших и средних по этому фактору территориях по сравнению с худшими территориями, где более высокие эти затраты формируют рыночную цену продукта. Величина ренты соответствует такому различию и выступает как общественная экономическая оценка условий устойчивого функционирования экосистемы и здоровой жизни населения на территории освоения недр.

Экологическая стратегия развития территории состоит в максимизации дифференциальной экологической ренты.

Экономическая стратегия освоения георесурсов заключается в максимизации экономической (горной) ренты.

Очевидно, что реализация одной из этих стратегий влечет за собой деградацию той или иной области жизнедеятельности. Поэтому, принимая во внимание взаимно противоположный характер изменения дифференциальной ренты обоих видов, согласование двух стратегий следует производить как сопряжение функций одного аргумента – предстоящих затрат на обеспечение необходимого качества среды в районе освоения недр.

Значения экологической и экономической дифференциальной ренты, фиксируемые при достижении такого качества, характеризуют базовое экологическое состояние территории.

Отклонения от этого состояния могут служить оценкой нарушения качества среды, в минимизации отклонения состоит цель экологического управления горным производством.

Такое базовое состояние можно рассматривать как равновесное состояние данной природно-хозяйственной системы. Равновесность в этом случае представляет собой баланс эффективности, достигаемый в результате как экономического использования ресурсов недр и природных ресурсов, так и при обеспечении качества окружающей природной среды, отвечающего экологическим требованиям.

### 3.3.5. Приоритетные научные направления в области горной экологии

Содержание современной горной экологии как науки раскрывается в последовательном воплощении следующей идеи: решение экологических проблем освоения недр может быть достигнуто лишь в процессе экологического управления собственно производством на всех его стадиях (создания, функционирования, прекращения деятельности и устранения его последствий).

Практика освоения недр дает немало подтверждающих примеров. Создание экологически сбалансированных техногенных ландшафтов; поиски, геологическая разведка и использование особых горных массивов и геологических структур для размещения в них специальных объектов; целенаправленное складирование вскрышных горных пород и отходов переработки полезных ископаемых и последующее их сохранение как складов промпродуктов; внутреннее отвалообразование и многое другое свидетельствует о появлении устойчивой тенденции к тому, чтобы подобное управление было направлено на сохранение и увеличение национального богатства, включая и его природную часть, относящуюся к недрам, при том, что все георесурсы в районе освоения – природные и техногенные – могли бы быть эффективно и экологически безопасно использованы горными предприятиями.

Приоритетные направления научных исследований определяются этими обстоятельствами.

К числу первоочередных направлений относятся следующие.

#### ***1. Изучение комплексного освоения недр как фактора экологической опасности***

Оно включает в себя:

- изучение и систематизацию фактов (проявлений) и тенденций, выражающих различного рода изменения окружающей среды под действием освоения недр;
- наблюдение и описание процессов геосистемного взаимодействия элементов и подсистем производства и среды;
- выявление и изучение экологических закономерностей техногенного преобразования недр;
- прогноз экологических последствий структурных и технологических изменений в освоении недр;
- анализ локальных, региональных и отраслевых факторов в экологических оценках состояния окружающей среды.

Можно назвать немало примеров, когда недостаточная экологическая изученность освоения недр приводит по прошествии времени к неблагоприятным, а в некоторых случаях и опасным последствиям.

Так, исследованиями Горного института Кольского научного центра (ГОИ КНЦ) РАН показано существование для района Хибин (Кольский полуостров) выраженной связи между масштабом горных работ, а именно накопленным объемом извлеченной из недр и складированной на поверхности породы (в том числе отходов переработки полезных ископаемых) и проявлениями горного давления в динамичной форме.

В период 1978–1990 годов на рудниках ПО «Апатит», более чем через 40 лет с начала подземной добычи, произошло более 20 горных ударов, из них 16 – на Кировском руднике. Сила удара, который классифицирован специалистами как техногенное землетрясение, зафиксированного на Кировском руднике 16 апреля 1989 года, достигала 5,5–6 баллов. Землетрясение записано всеми сейсмическими станциями Скандинавских стран и Европейской части бывшего Союза, оно вызывало нарушения целостности зданий в Кировске и пос. Кукисвумчорр. На самом руднике во всех выработках, пересекаемых тектоническим нарушением, произошли выбросы породы объемом 1–1,5 м<sup>3</sup>, разрушена крепь, деформированы рельсовые пути и кран-балки, деформированы и смещены проводники и направляющие главного ствола и лифтового восстающего. Разрушены бетонные фундаменты оборудования.

Как показали исследования, в Хибинах большинство землетрясений происходит вблизи действующих рудников и в южной части массива, где созданы большие хвостохранилища обогатительных фабрик и ГРЭС, т.е. где техногенное воздействие на поверхность весьма велико.

Наиболее сильные геодинамические события, подобные землетрясениям и обусловленные освоением недр, отмечены в последние годы также в Германии на калийном месторождении Верра, Острavo-Карвинском угольном бассейне Словакии, на Северо- и Южноуральских бокситовых рудниках, на железорудном Таштагольском месторождении в Горной Шории и др.

Совместно с определенными природными условиями (высокопрочные хрупкие породы с тектоническими неоднородностями в пределах зоны горных работ, гористый рельеф, высокий уровень горизонтальных тектонических напряжений в массиве, зоны с большими градиентами скоростей новейших тектонических движений) крупномасштабное освоение недр и взрывные воздействия при горных работах создают необходимую совокупность условий для формирования техногенных землетрясений.

Известны также случаи мощных подвижек в верхней части земной коры, спровоцированных интенсивной эксплуатацией нефтяных и газовых месторождений.

Изучение природных и техногенных процессов, подводящих к возникновению возможности зарождения и реализации подобного рода явлений, позволит

более глубоко познать их механизм и разработать достаточную систему предупреждающих мер.

## **2. Создание научных основ мониторинга изменений в окружающей природной среде под действием освоения недр**

Актуальными представляются следующие области исследований:

- систематизация и параметризация изменений состояния природных объектов при различных техногенных воздействиях на них;
- методы наблюдения и измерения параметров состояния природных объектов, особенно для медленно нестационарно протекающих процессов при малых амплитудах возмущающих воздействий;
- проблемы технического и программного обеспечения мониторинга различных видов.

Систематизированное представление о воздействии горнодобывающих предприятий на природную среду и о соответствующих факторах, важное для научного обоснования мониторинга, раскрывается в связи с анализом отдельных аспектов такого воздействия.

Вид и характер воздействия в первую очередь определяется его источниками. Для горнодобывающих предприятий перечень таких источников известен, в целом он постоянен и достаточно изучен. Источники техногенных воздействий на среду полностью соотносятся с технологическими процессами, в которых реализуется геологоразведка полезных ископаемых, инженерное обустройство территории, добыча и переработка полезных ископаемых, строительство поверхностного комплекса и объектов производственной и социальной инфраструктуры. Это – разрушение массива горных пород, их извлечение на поверхность, складирование отходов, перегрузка полезных ископаемых, дробление горных пород и их измельчение при переработке, сушка, окомкование, химическое разложение, транспортирование и многое другое.

Характер воздействия во многом зависит от конкретного сочетания природных ресурсов (с их местными особенностями) и отдельных природных объектов в составе лито-, гидро- и атмосферы, в чем состоят конкретные особенности местных биогеоценозов.

Воздействия на природную среду могут быть классифицированы по интенсивности, т.е. по скорости изменения исходного состояния природных объектов – элементов биогеоценозов.

По этому признаку среди воздействий следует различать: катастрофические (приводящие, например, к техногенным землетрясениям или внезапным крупным проседаниям поверхности), сильные (следствием чего являются, в частности, сейсмические нарушения целостности природных откосов), средней силы, слабые и незначительные.

Системность воздействий, как и системность проявления последствий этого, представляет важную их характеристику, и по этому признаку целесообразно различать воздействия системные, комплексные и локальные. К первым следует

отнести образование крупных полостей в геологических блоках (карьерного пространства, например), которое влечет за собой изъятие земель, сокращение площадей сельхозугодий, дренирование поверхностных вод и осушение массива пород в целом, повышение уровня запыленности и загазованности территории, в некоторых случаях изменение геодинамического режима района и многое другое, т.е. имеет следствием глубокое преобразование биогеоценоза по его структуре, исходному состоянию, энергетическому потенциалу, качеству природных ресурсов, биологическому разнообразию, устойчивости.

В сравнении с этим примером системного воздействия засоление почв в результате вымывания атмосферными осадками солей из отвалов пород, образующихся в результате работы калийных рудников, можно отнести к комплексным воздействиям, влияние которых распространяется не на все природные среды, а в некоторых из них не является масштабным и интенсивным.

### ***3. Идентификация экологических процессов, разработка критериев и методов инженерно-экологических и эколого-экономических оценок изменений в окружающей природной среде***

Наиболее важным здесь следует считать:

- разработку методов оценки техногенной нагрузки на объекты окружающей природной среды и экологической опасности;
- создание научных основ экологического нормирования техногенного воздействия на природные объекты и природную среду, экологической сертификации и экспертизы;
- совершенствование методов экономической оценки экологических последствий изучения, освоения и сохранения недр;
- установление граничных условий в процессах взаимодействия природных и техногенных геосистем.

Распознавание тех процессов, которые обусловлены взаимодействием природных и техногенных геосистем и могут приобрести экологическую значимость, как и установление необходимых по экологическим условиям ограничений для режима протекания этих процессов возможно лишь в том случае, если может быть установлено и оценено качество природной среды. Вне этого условия исследование каких бы то ни было аспектов обеспечения экологической безопасности освоения недр лишены смысла.

Экологические критерии качества окружающей природной среды включают, в частности, высокую биологическую продуктивность (для данных климатических условий), оптимальное соотношение видов, биомассы популяций, находящихся на различных трофических уровнях. При этом отмечается, что «... высокое (или приемлемое) качество природной среды... означает:

- а) возможность устойчивого существования и развития исторически сложившейся, созданной или преобразованной человеком экосистемы в данном месте;
- б) отсутствие в настоящем и будущем неблагоприятных последствий у любой (или наиболее важной) популяции (в первую очередь у человека, причем

подразумевается отсутствие неблагоприятных условий для каждого человека), которая находится в этом месте исторически или временно».

Как видно, практически сейчас применяемый и необходимый подходы для оценки качества окружающей среды отличаются друг от друга принципиально.

Научная проблема создания соответствующей теории и методов экологического нормирования качества природной среды при освоении недр очевидна.

Принимая во внимание, что многие важнейшие по масштабу, интенсивности и опасности воздействия на природную среду со стороны горного производства имеют необратимые последствия, следует признать, что сохранить природную среду на территории освоения недр в ее естественном исходном состоянии не представляется возможным.

Поэтому для данного случая единственно реальным подходом является установление качества природной среды совместно с экологическими оценками освоения недр в процессе оптимизации параметров состояния геосистем.

#### ***4. Оптимизация экологических параметров природно-технических систем***

Для развития этого научного направления необходимо:

- совершенствование моделирования взаимодействия природных и техногенных геосистем как изменяющихся во времени целостных сложных объектов;
- исследование экологического риска в процессах освоения недр;
- выявление, систематизация и установление закономерностей изменения свойств природно-технических систем (целостности, устойчивости и др.).

В горной экологии оптимизация связана в первую очередь как с необходимостью, так и с особенностями установления граничных условий развития техногенных геосистем в процессах их взаимодействия с природными объектами при освоении недр с целью обеспечения экологической безопасности.

Такая ориентированность науки находит свое выражение в постановке задач оптимизации.

Для биологических, экологических систем задачи их изучения ставятся и последовательно усложняются исследователями, руководствующимися во многом возможностью использования разработанных методов их решения, которые, в свою очередь, основаны на достижениях математических или физико-математических разделов науки.

Решение многих задач экологии, где устанавливаются параметры изменения численности популяций, основано на использовании и развитии ставшего классическим математического аппарата, созданного В. Вальтерра для исследования процессов борьбы за существование.

Сейчас практически повсеместно экологические задачи решаются с применением математических моделей, в которых процессы описываются дифференциальными уравнениями.

В задачах экологической оптимизации, понимаемой в широком смысле, самостоятельное и большое значение могут приобрести оценки экологического

риска. В настоящее время исследования экологического риска имеют постановочный характер, однако экологическое состояние большинства горнопромышленных регионов таково, что оценки экологического риска осуществления хозяйственных и технических мероприятий, связанных с освоением недр и изменяющих экологическую ситуацию, приобретают жизненную важность.

Таким образом, анализ положения дел показывает, что освоение недр порождает крупные экологические проблемы. В их решении важнейшее значение с научной точки зрения имеет устранение все более очевидного расхождения между системным, интенсивно расширяющимся и углубляющимся взаимодействием окружающей природной среды с техногенными объектами и процессами и в основном описательным, фрагментарным характером существующих знаний со слабо развитой расчетно-аналитической базой, что обусловлено необходимостью устранения лишь непосредственно наблюдаемых отрицательных экологических последствий осуществления локальных технических решений. К этому следует добавить, что темпы, которыми идет накопление новых горно-экологических знаний, существенно уступают темпам, с которыми происходит усугубление экологической ситуации в горнодобывающих регионах.

Научное развитие в области горной экологии должно быть ориентировано в связи с этим в направлении придания исследованиям системного аналитического характера, отвечающего особенностям функционирования природно-технических (природно-экономических и др.) геосистем, в которых реально организуется освоение недр.

### Список литературы к разделу 3.3

1. *Одрин А.А.* Проблемы эколого-экономической оценки состояния и перспективы добычи угля в Кузбассе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1994. – № 2. – С. 142–147.
2. *Реймерс Н.Ф.* Охрана природы и окружающей среды: словарь-справочник. – М.: Просвещение, 1992.
3. *Осинов В.И.* Геоэкология – междисциплинарная наука об экологических проблемах геосфер // Геоэкология. – 1993. – № 1. – С. 4–18.
4. *Реймерс Н.Ф.* Экология (Теории, законы, правила, принципы и гипотезы). – М.: Россия молодая, 1994.
5. *Певзнер М.Е., Костовецкий В.Н.* Экология горного производства. – М.: Недра, 1990.
6. Экология горного производства / *Г.Г. Мирзаев [и др.]*. – М.: Недра, 1991.
7. *Иванов Б.А.* Инженерная экология. – Л.: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1989.
8. *Красавин А.П.* Защита окружающей среды в угольной промышленности. – М.: Недра, 1991.
9. *Колосов А.В.* Эколого-экономические принципы развития горного производства. – М.: Недра, 1987.

10. Мазур И.И., Молдованов О.И. Введение в инженерную экологию. – М.: Наука, 1989.
11. Астахов А.С., Диколенко Е.Я., Харченко В.А. Экологическая безопасность и эффективность природопользования. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 323 с.
12. Певзнер М.Е. Горная экология: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 396 с.
13. Куликова Е.Ю. Теоретические основы защиты окружающей среды в горном деле: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. – 611 с.
14. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидроэкологии: в 4 кн. – Т. 1 – 611 с., Т. 2 – 394 с., Т. 3 (1) – 312 с., Т. 3 (2) – 504 с. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2002.
15. Смирнов А.М. Основы геоэкологического мониторинга угольных шахт. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 268 с.
16. Куликова Е.Ю. Методология выбора экологически безопасных технологий подземного строительства: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. – 342 с.
17. Коваленко В.С., Голик Т.В. Рекультивация нарушенных земель на карьерах: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1. Основные требования к рекультивации нарушенных земель. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2003. – 165 с.
18. Куликова Е.Ю. Подземная геоэкология мегаполисов: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. – 611 с.

### 3.4. Горная информатика

Горному делу свойственна в значительной степени неопределенность данных, служащих базой для принятия различных решений, и как следствие этого обстоятельства – часто наблюдаемое неподтверждение ожидаемых результатов реализации этих решений.

Такое явление подтверждается широкой практикой производственной апробации научных выводов и рекомендаций, многочисленными фактами отклонения фактических показателей работы горных предприятий от предусмотренных в проектах или планах работ.

Подобное положение следует считать закономерным для горного дела, но проблема состоит в том, чтобы при освоении недр иметь возможность понимать и определять меру неопределенности информации (соответственно, меру достоверности решений), необходимую и достаточную в каждом конкретном случае.

#### 3.4.1. Информатизация в горном деле

Горные предприятия с точки зрения изучения, проектирования и управления относятся как геосистемы к высшей категории сложности. Они представляют собой многопараметрические и многофакторные природно-технологические

объекты, развивающиеся в пространстве в течение длительного времени (20–30 лет и более) и характеризующиеся большими объемами различного вида информации:

- геологической, включающей в себя результаты экспериментальных исследований свойств и качественного состава полезных ископаемых, других георесурсов и вмещающих пород, характеристику напряженно-деформированного состояния и структурных неоднородностей породного массива, гидрогеологические особенности и структуру месторождений и процессов, происходящих в недрах при их освоении;

- геометрической, включающей элементы месторождений полезных ископаемых и других георесурсов, а также технологии горных работ, рассматриваемые в трехмерном пространстве горного отвода;

- технологической и технической, включающей параметры и качественные характеристики элементов горных выработок, горно-транспортного оборудования и технологических процессов;

- экологической, отражающей взаимодействие технологических процессов горного производства и природных объектов – недр, поверхности земли, окружающей атмосферы, водных ресурсов;

- экономической, содержащей показатели и оценки расхода ресурсов, показатели ценности продукции, интенсивности и эффективности производства работ и т.д.

Большое значение имеет также систематическое пополнение информации о результатах научно-исследовательских работ.

Основные параметры и определяющие факторы (геометрии, количества, качества, динамики) находятся в сложной взаимосвязи и в комплексе составляют для каждого объекта настолько значительный информационный массив данных, что получение достоверных выводов в большинстве задач изучения освоения недр, принятия решений в проектировании и управлении горным предприятием возможно лишь на основе компьютерных информационных систем.

В обобщенном виде процесс информационного обеспечения в любой области деятельности включает три стадии: измерение и регистрация данных об объекте; обработка, отбор и хранение данных; анализ, обобщение и выработка альтернатив решений. Каждая из перечисленных стадий обеспечивается соответствующей подсистемой: информационно-измерительной, информационно-вычислительной, моделирующей и т.д. Системный подход в информационном обеспечении изучения освоения недр, а также работы горных предприятий реализуется с помощью информационных (компьютерных) технологий, представляющих определенную последовательность процедур, характерных для всех трех стадий. При этом используется различная по форме информация об объекте: описательная (текстовая часть отчетов и проектов, заключения); графическая (карты, разрезы, графики, номограммы); цифровая (показатели свойств, состава,

параметров состояния среды, результаты работы оборудования и предприятия); аналитическая (зависимость качества, состояния, структуры и геометрии объекта от координат пространства и времени).

Информационные технологии при их использовании в горном деле обеспечивают новый качественный уровень сбора, накопления, обработки информации о различного рода горных и природных, в том числе геологических, объектах при проектировании и конструировании сложных природно-технологических систем на базе АИС (автоматизированная информационная система), САПР (система автоматизированного проектирования) и др. Это позволило значительно увеличить объемы оперативно обрабатываемой информации, агрегировать разнообразные информационные массивы (геологические, геометрические, технологические и др.) в задачах управления, математического моделирования и оптимизации горных предприятий, повысить достоверность принимаемых решений.

Информационное обеспечение технологическими процессами на уровне АСУТП (автоматизированная система управления технологическими процессами) состоит в представлении необходимой информации в систему диспетчерского управления с целью оперативного обнаружения критических ситуаций, информативной поддержки решений по предупреждению и ликвидации нарушений в ходе производства. На более высоком уровне организации используется АСУП (автоматизированная система управления предприятием), состоящая из модулей, накапливающих технологическую информацию в иерархическом порядке и представляющая технико-экономическую и горно-техническую информацию о предприятии в целом.

На первом этапе автоматизация технологических процессов была основана на использовании локальных систем и средств получения первичной информации с принятием решения без учета других факторов. В дальнейшем перевод машин и оборудования на путь автоматизированного управления выявил несогласованность при совместном взаимосвязанном управлении ими. Поэтому при значительном увеличении потока поступающей информации стали применять современные средства вычислительной техники, обеспечивающей выполнение большого числа вычислительных операций в реальном масштабе времени с разработкой алгоритмов, по которым может быть обработана информация для выявления опасных тенденций в поведении рудничной среды, предаварийных ситуаций.

Горная информатика явилась следствием и продолжением работ по САПР горных предприятий, АСУТП и АСУП и сформировалась в результате развития методов измерения и математического моделирования, отвечающих уровню современных компьютерных технологий и связывающих единой информационной базой объекты и задачи физики, геологии, горного дела, топографии, горной экологии и экономики.

Общая тенденция нарастания компьютеризации в мировой практике оказывает непосредственное влияние на горные науки и приводит к необходимости

пересмотра взглядов на значение собственно информации и информационной деятельности. Если до недавнего времени в нашей стране информатизация сводилась лишь к процессам обмена научно-технической информацией, к разработке информационно-поисковых систем, то сейчас основной интерес состоит в системном анализе, обобщении и интерпретации комплексной разноуровневой информации. При этом открылось очень важное следствие компьютерного развития – объективно обусловленная необходимость переоценки значения собственно информации и процессов ее производства, хранения, преобразования и потребления, а свойство компьютера быть универсальным преобразователем информации делает распространение современных информационных технологий всеобъемлющим.

Создание и развитие информационных систем для горно-геологического научного комплекса проходило в два этапа. На первом этапе возникли методы и средства разовых измерений основных физических свойств и качественных характеристик полезных ископаемых и вмещающих пород. Далее были разработаны средства для автоматизации таких измерений при исследовании горных пород, затем – автоматизированы функции регистрации, хранения, анализа и воспроизведения простейшей информации.

Доступ в ЭВМ на втором этапе обеспечил в 60–70-е годы прошлого века развитие программного обеспечения – отдельных программ, реализованных в виде картографической базы данных, увеличение мощности ЭВМ. Созданная в 70–80-х годах система программ обеспечила возможность обработки и анализа пространственных данных. Последнее десятилетие привело к созданию автоматизированных систем обработки и банков данных, возможности построения и анализа моделей и т.д.

В горной информатике большое значение имеют следующие обстоятельства.

Во-первых, представление о предмете горных наук в целом. Если, как было признано ранее, горные науки изучают производство на всех его стадиях – моделирования (проектирования), создания и далее, вплоть до ликвидации горных предприятий, и делается это с учетом эксплуатации месторождений полезных ископаемых, изменяющих свои свойства горных массивов, результирующих показателей деятельности, то внешний контур необходимого информационного массива данных, каким бы большим этот массив не был, будет соответствовать «предельной» проблеме: что есть горное производство и в какой степени совершенным оно может быть?

В том случае, если эта «предельная» проблема интерпретируется так, чтобы установить, что есть техногенно-изменяемые недра Земли и насколько рациональным с позиций устойчивого развития существующих ныне и будущих поколений должно быть их преобразование исходя из общего критерия сохранения и увеличения сосредоточенного в них национального богатства в результате выявления в недрах и применения новых георесурсов, то внешний контур инфор-

мационного массива и его внутренняя структура, а также интегральный критерий развития будут уже иными.

Во-вторых, информация в горном деле обладает двойственной природой – она объективна, как и любая другая, но она же наряду с этим имеет четкий адрес. Этот адрес подразумевает конкретное лицо, принимающее решение (ЛПР), а точнее – должностное положение такого лица, реализующего соответствующие этому положению функциональные обязанности в иерархии управления освоением и сохранением недр. К категории ЛПР необходимо отнести также ученых, изучающих недра в горном деле в тех или иных областях знаний в меру своей профессиональной ориентации, должностной и научной компетенции. С этой же точки зрения следует рассматривать и работников высшей горной школы.

Поскольку проблемы информации в горном деле должны рассматриваться в связи с принятием конкретных решений (с точки зрения науки, проектирования, управления производством, социальной ориентации коллективов трудящихся, оздоровления экологической ситуации, повышения профессионального уровня работников управления и др.), сама информация всегда организована в проблемно ориентированные информационные системы с более или менее устойчивой структурой и четкими границами. В наибольшей степени устойчивость и определенность границ в системах информации свойственны горному образованию, проектированию горных предприятий и управлению ими, в наименьшей – научным исследованиям.

При этом расширение границ применения современных информационных технологий в горном деле в силу своей природы вносит весьма сильную регламентацию в весь процесс пользования информацией, делая совершенно необходимым сквозную информационную совместимость, в частности, в разработке баз данных и банков знаний. Такой регламентацией сейчас охватывается и научная деятельность. Информация структурируется и системно организуется в целом по областям знаний горных наук, в них – по отдельным горным наукам, затем – по соответствующим основным научным направлениям, задачам, темам и т.д.

Аналогично обстоит дело и в горных вузах, где «банки знаний» и «базы данных» соответствуют учебным специальностям и специализациям. В равной степени это относится и к научным квалификационным специальностям.

В-третьих, исходя из положения и системной организации информации предъявляют соответствующие требования (или допущения) к ее составу, объему, достоверности и другим характеристикам. Так, для аппарата управления предприятием многие требования к информации становятся понятными из Стандарта предприятия и разрабатываемых на его основе положений о функциональных отделах и должностных обязанностях работников этих отделов. Для проектировщиков требования к информации следуют из Методики проектирования предприятий и Норм технологического проектирования, разрабатываемых

и утверждаемых в недавнем прошлом в каждой отрасли горнодобывающей промышленности.

В целом, применительно к промышленности, можно привести весьма обширный перечень различных нормативно-технических документов, обязательных к использованию и дающих вполне определенное представление об источниках получения, составе, объеме требуемой информации.

Многие параметры необходимой информации задают исходя из специфики и назначения тех или иных способов воплощения информационных технологий. Так, необходимость автоматизации технологических процессов и оперативно-диспетчерского управления может быть вызвана усложнением внутрипроизводственных связей, в частности, из-за ухудшения горно-геологических условий разработки месторождений, интенсификации горных работ, становления рыночных условий хозяйствования или по другим причинам. Этим определяются новые требования к информативной оперативности и достоверности, уровню организации управления технологическими процессами и предприятием в целом. Уровень же автоматизации технологическими процессами зависит от возможности осуществления самого автоматизированного оперативного контроля, что в большинстве случаев ограничивается отсутствием методов такого контроля.

Автоматизированные системы управления производством разрабатывают исходя главным образом из его организационной структуры, а также из требований документооборота и отчетности.

Следует заметить, что совокупности требований к информации, обеспечивающей принятие тех или иных решений по поводу освоения недр на всех уровнях и во всех формах деятельности, сами составляют подобно системам информации некие не вполне определенные системы. Так, например, методы анализа вещественного и минерального состава твердых полезных ископаемых, используемые в практике геолого-разведочных работ, могут в некоторых случаях определить выбор способа разведки месторождений и их оценку, что, в свою очередь, обусловит производственную мощность предприятия, степень полноты и комплексности освоения запасов, многие экономические и экологические характеристики производства.

В-четвертых, когда речь идет об информации в горном деле, обычно подразумевается информация знаковая (число, точка, линия, буква). Это дает возможность оценивать объем информации, ее качество с точки зрения создания условий для сбора, передачи, обработки и т.д. Вместе с тем инженерный или научный вывод (это хорошо известно горнякам) никогда не основан на операциях только с такой информацией. Вывод, решение в горном деле всегда подразумевает использование неформализуемой информации, объем которой зависит от опыта ЛПР и его интеллекта, интуиции, знания общей для данной задачи обстановки. Причем чем масштабнее задача, тем более значимы последствия ее решения, чем больший объем знаковой информации привлекается для этого, тем более значимой, преимущественной, становится роль информации неформали-

зуемой. Следовательно, результат использования информации зависит, при прочих равных условиях, от личностных качеств лица, принимающего решение, которое в конечном счете и определяет рациональные информационные пределы своей деятельности.

В завершение подчеркнем, что проблемы информации – это проблемы снижения до рациональных пределов уровня неопределенности в любой профессионально ориентированной и системно организованной области деятельности. Факторы, которые обуславливают неопределенность решений в горном деле, и слагаемые неопределенности связаны здесь со спецификой именно этой сферы научных знаний и производства. Вместе с тем эти факторы и слагаемые указывают на те направления научных исследований, где могут быть получены результаты, превышающие информированность и, следовательно, снижающие неопределенность в деятельности лиц, принимающих решения в области освоения и сохранения недр.

### 3.4.2. Понятие, предмет и цель горной информатики

Необходимо различать понятия: информатика, геоинформатика и горная информатика.

Понятие «информатика» возникло в середине 70-х годов прошлого века для характеристики области знаний, связанных с разработкой, созданием, использованием и материально–техническим обслуживанием систем обработки информации, включая машины, оборудование, математическое обеспечение, организационные аспекты.

**Геоинформатика** сформировалась в результате развития математического моделирования природных объектов и процессов, необходимого для решения задач компьютеризации в науках о Земле, а также как область знаний, специфический характер которой обусловлен особенностями информации о природных объектах и процессах. Эти особенности связаны с их представлением массивов точек в трехмерном пространстве.

Геоинформатика получила широкое распространение в географии, картографии, экологии, а также в таких отраслях наук, близких непосредственно к горному производству, как геофизика, геология, геодезия. Основы геоинформатики заложены в работах канадских и шведских ученых по созданию в 60–70-х годах автоматизированных информационных систем для обработки пространственно-временных данных в задачах землеустройства. Становление геоинформатики как науки происходило в 70–80-е годы прежде всего в картографии, геофизике, экологии.

Термин «геоинформатика», до последнего времени малоизвестный, начал широко применяться лишь в последние десятилетия. В англоязычной литературе более распространен термин «GIS technology»: GIS – аббревиатура термина «geographical information systems» – географическая информационная система (ГИС) или сокращенно – геоинформационная система.

Понятие «географическая информационная система» (ГИС) появилось в США в начале 80-х годов и первоначально употреблялось для определения информационных систем, связанных с автоматизированной обработкой пространственных данных (дистанционное зондирование, геодезия, картография, фотограмметрия и др.) со свойственными им общими признаками (определение места каждого признака в географическом пространстве, представление каждого признака, установление связи одного признака с другими на карте и т.д.). Расширение круга решаемых задач и связанные с этим разработка, совершенствование и широкое использование информационных систем привели в последующие годы к появлению большого числа терминологических синонимов – «системы пространственной информации», «системы географических данных», «информационные системы по природным ресурсам», «информационные системы по землепользованию» и др.

В отечественной горной науке термин «геоинформатика» был применен впервые, по-видимому, в 1985 годах. Затем основные положения горной геоинформатики получили развитие в ряде диссертационных работ, опробованы в приложении к компьютерным технологиям проектирования и планирования открытых разработок, вошли в учебник для вузов. Профессор О.Л. Кузнецов в 1989 году сформулировал проблемы и задачи геоинформатики как науки. В 1992 году вышла в свет монография «Геоинформатика», адресованная геофизикам и геологам. В ней, в частности, были даны основные понятия и определения, сформулированы цель и задачи геоинформатики, определены предметы исследований и условия применения, а также достаточно подробно и широко рассмотрены применительно к условиям геофизических исследований вопросы сбора и регистрации геоинформации, формирования баз данных. Геоинформатика представлена в этой работе как пограничная между науками о Земле (геономией) и собственно информатикой область знаний, изучающая законы и методы геоинформации.

В 1993 году была создана ассоциация содействия развитию рынка геоинформационных технологий и услуг, которая в 1995 году провела 2-й Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес». В том же году был начат выпуск журнала «Геоинформатика».

Таким образом, геоинформатика, как новое направление в науке о Земле, получившая в последние годы интенсивное развитие, быстро шагнула в сферу практического приложения в различных отраслях. Были созданы научно-исследовательские и производственные организации, лаборатории, кафедры, а в структуре Федеральной службы геодезии и картографии – региональные научно-производственные центры геоинформации.

Отличительные черты горной информатики обусловлены новым пониманием предмета, цели и содержания горных наук.

***Горная информатика представляет собой область знаний о явлениях и поведении объектов при освоении недр, как об информационных процессах,***

**закономерности которых устанавливаются при получении, передаче, обработке, интерпретации и использовании информации.**

Кроме того, **горная информатика** выявляет и объясняет закономерности, в соответствии с которыми формируются и развиваются системы информации как совокупности знаний, уменьшающих неопределенность в выборе возможностей освоения и сохранения недр как ресурса жизнедеятельности – природного средоточия огромного национального богатства.

Информатика в горном деле, ориентированная в этом направлении, раскрывает структуру систем информации, объясняет объективный характер связей информационных элементов в этих системах, изучает факторы эволюции последних и рациональные пределы информационных массивов, необходимых и достаточных для принятия достоверных решений.

Горная информатика показывает, как в специфических для освоения недр условиях создать рациональную систему получения информации необходимых видов и объема с учетом наилучшего сочетания методов изучения, природных и техногенных объектов и явлений. Кроме того, горная информатика указывает на актуальные направления совершенствования, информационного обеспечения развития горного дела, освоения и сохранения недр при ограниченных финансовых средствах, времени и материально-технических ресурсах. Эта горная наука анализирует достижения информатики и обосновывает рекомендации по их эффективному применению для решения задач горной информатики.

**Объектами информационного изучения являются:** природные явления, наблюдаемые в недрах; техногенные процессы в горных массивах, сопутствующие освоению недр; горные объекты (природные и искусственные), находящиеся на земной поверхности и ниже ее уровня, а также их взаимное расположение; параметры изменения состояния процессов и объектов; экологические и экономические последствия освоения недр в различных формах их проявления; производственные параметры, а также динамика их изменения при управлении производством.

При этом каждый объект отличается: разнообразием видов информации, обрабатываемой при научных исследованиях и принятии решений в условиях производства (геологическая, геофизическая, технологическая, экономическая, экологическая и т.д.); высокой степенью изменчивости, неопределенностью и закономерно недостаточностью исходной информации; динамичностью горного производства в сочетании с необходимой долговременной сохранностью инженерных сооружений и коммуникаций; сложностью и зачастую практической невозможностью проведения промышленных и лабораторных экспериментов, необходимостью замены их приближенными вычислительными и экономическими экспериментами и экспертизами; пространственно-распределенным взаимодействием с недрами и окружающей средой и необходимостью оптимизации этого взаимодействия на длительный срок и др.

*Предметами изучения горной информатики являются:* признаки, идентифицирующие указанные объекты; методы регистрации численных значений признаков; методы, программные и технические средства операций с проблемно ориентированными массивами информации.

*Цель горной информатики* состоит в обеспечении получения научных выводов, а также инженерных решений, уменьшающих в необходимой степени неопределенность в выборе возможностей освоения и сохранения недр.

### 3.4.3. Структура и технические средства горной информатики

Структура горной информатики включает в себя следующие составные части: экспериментальную, которая реализуется через наблюдения, измерения контроль объекта; вычислительную, которая связана с использованием программно-алгоритмических компьютеризированных средств обработки информации, моделей и математических методов анализа банков данных и знаний; аналитическую, обеспечивающую подготовку альтернатив управляющих решений и суждений.

Для каждого горного объекта или явления информация, даже отдельно взятая по любому аспекту его изучения и оценки, представляет значительный массив исходных данных, промежуточных и конечных результатов.

Количество точек и значений параметров, характеризующих форму, структуру и содержание (состояние) объекта, является показателем информационной плотности, которая может быть определена в целом для объекта или в виде удельных величин, т.е. по количеству точек и значений, отнесенных на единицу площади, объема или длины, например на 1 га площади земельного отвода горного предприятия, на 1 млн м<sup>3</sup> объема карьера, на 1 км длины транспортных коммуникаций и т.п.

Показатели информационной плотности могут служить для информационной оценки объекта, сравнения способов моделирования, определения степени полезного использования первичной информации на различных стадиях ее переработки. Информационная плотность характеризует во многом трудоемкость подготовки данных, стоимость хранения и переработки информации. Выделены три вида плотности: теоретическая, определяемая расчетом из условия достижения высокой степени приближения математической модели к реальным условиям; фактическая, т.е. исходная, получаемая в результате инструментальных измерений, съемок; практическая, используемая в графических и математических моделях.

В процессе переработки информации один ее вид переходит в другой. Так, первичными данными, характеризующими форму залежей и другие параметры месторождений, являются результаты геологической разведки (в частности, пробы по скважинам), которые представляют в форме списков и таблиц чисел. Затем для практических целей эти данные трансформируют в геоло-

гические разрезы и погоризонтные планы, т.е. в геологические графические модели, в результате чего изменяется значение показателя информационной плотности.

Для автоматизированных расчетов графические модели преобразуются в математические, т.е. вновь приобретают числовую форму. Если плотность первичных данных составляет около 800–500 чисел на 1 млн м<sup>3</sup> горного отвода, то в графических и блочных математических моделях, построенных на основе погоризонтных планов и геологических разрезов, она составляет 30–100 чисел, т.е. в 5–10 раз меньше. Поскольку математические модели идентичны графическим (погрешность обычно не более 2–5 %), последние также характеризуются аналогичными показателями геоинформационной плотности.

Таким образом, как геологические разрезы и погоризонтные планы, так и основанные на них модели далеко не полностью используют фактическую, т.е. первичную информацию, полученную в результате разведки и, следовательно, представляют формы и качество залежей месторождения в весьма упрощенном виде, внося тем самым в построенные на моделировании выводы и решения задач дополнительную неопределенность, связанную с обработкой первичной информации.

Несмотря на многофакторность и разномасштабный характер получаемых и используемых данных, структура горной информатики должна отвечать требованиям организованности, адаптивности и эффективности. Организованность здесь – это способность поддерживать целесообразную автономию частей целого в изменяющихся условиях освоения недр и производства работ для сохранения им своей внутренней упорядоченности в обработке информации. Адаптивность – способность поддерживать адекватное отображение реально изменяющихся явлений и поведения различных объектов посредством введения баз данных, классификаторов информации и форм документов. Под эффективностью понимается отображение свойств в части способности оценивать результативность выполнения им поставленных целей управления.

Познание объектов и процессов реализуется путем наблюдений, измерений и контроля. При наблюдении объект изучают в условиях, исключающих воздействие на него со стороны исследователя. Измерения и контроль предполагают: выбор системы опознания – отождествление объекта с одной из возможных его моделей; использование определенных методов и средств, позволяющих оперировать исследователю числом, функцией или суждением; передача этой информации от источника сообщения к пользователю.

Процесс получения любой информации базируется на информационной теории измерения, которая рассматривает данный процесс как совокупность ряда последовательных измерительных и других преобразований. При этом величина выходного сигнала (конечного результата) зависит от свойств и параметров его составных элементов, т.е. сигналы от источников сообщения регистрируются в условиях наложения помех. Этот процесс можно представить в виде ин-

формационной модели: параметры геологического или любого другого объекта (явления)–результаты измерений–результаты интерпретации.

Эффективность измерений связана также с числом одновременно регистрируемых показателей, количеством и характером помех. Для качественной оценки эффективности измерений и интерпретации вводят меры оптимальности решений: меры точности, меры надежности, показатели сравнительной эффективности. Важнейшим показателем при измерении и интерпретации является чувствительность результата измерения или интерпретации к вариации какого-либо параметра информационной модели. Отсюда и информативность экспериментального метода познания.

Информацию, собранную по результатам измерений и контроля, а также содержащуюся в литературных источниках, отчетах предыдущих работ и в архивах, относят к накопленной, а информацию, полученную непосредственно при проведении опытных работ, – к оперативной.

Различный характер информации обуславливает различные системы сбора и регистрации. Если при разовом оперативном контроле регистрация показаний прибора ведется посредством записи в журнал или на другие бумажные носители, то для непрерывных длительных измерений большую роль играет приборная запись информации аналоговым способом (на бумажные и магнитные носители – перфоленты, перфокарты, магнитные ленты, диски). Компьютеризация измерений привела к цифровому способу записи информации.

Для многих методов изучения горных пород и массивов (геомеханических процессов) широко применяют цифровую регистрацию с аналого-цифровым преобразованием сигнала. При этом используют современный путь преобразования сигналов путем квантования по уровню (кодирование амплитудных значений) и квантование по времени (дискретизация).

Сбор информации о свойствах и состоянии недр представляет собой систему последовательного накопления данных с применением широкого набора методов получения информации: космического, аэрофотофизического, геодезического, собственно геофизического, геологических съемок, бурения, каротажа, документации и анализа керна, скважинной, межскважинной и подземной геофизики, разведочных и эксплуатационных горных выработок.

Каждый из перечисленных методов представляет собой группу способов измерения, сбора, хранения и обработки информации, имеет свою систему понятий и терминологии. Это ведет к возникновению огромных информационных массивов, с которыми может справиться лишь информационно-вычислительный комплекс (ИВК). Так, при проектировании угольных предприятий в состав исходных геоданных входят более 25 показателей о породах, угольном пласте и углевмещающем массиве.

Процесс обработки информации включает четыре последовательные стадии: первая (начальная), цель которой – создание в машинной памяти цифровых моделей наблюдаемых полей с учетом их привязки; вторая – содержательная обработ-

ка с качественным и количественным анализом информации; третья – интерпретация данных (по методу и в комплексе); четвертая – формирование архива с целью многократного использования данных для переработки, возможной новой интерпретации и обобщения.

Организация и оптимизация любых работ с большим объемом многофакторной информации, используемой в различные периоды времени различными пользователями, требуют наличия накопительных баз данных.

ИВК характеризуется возможностями создания базы (банка) данных и базы (банка) знаний, чему способствует развитие информационно-вычислительных сетей, обслуживающих индивидуальных и коллективных пользователей информации. Наличие баз данных и знаний, а также сетей обеспечивает возможность постоянного их функционирования с определенной степенью доступности, непрерывного сбора и хранения, широкого обмена информацией на различных масштабных уровнях.

База данных разрабатывается в интересах конечных пользователей (абонентов подсистемы), поэтому в основу проектирования закладываются представления (концептуальные требования) конечных пользователей.

На основе компонентов баз данных создают цифровые объемные модели изучаемых объектов. Модели являются исходной информацией для геолого-экономической оценки подсчета запасов, геотехнологического картирования, проектирования систем отработки месторождений и т.п. Каждая последующая стадия использования данных порождает свою, более детальную объемную модель. Анализ модели, полученной на заданной стадии проведения работ, обеспечивает основу проектирования и планирования работ последующей стадии.

Содержимое банка знаний не исчерпывается описательными моделями объектов и явлений, хотя они составляют его важнейший компонент. Так, для каждого объекта банк хранит характерные разрезы (планы) и другие материалы в виде традиционных для геологов и горняков изображений, что позволяет преодолеть терминологические и понятийные различия в толковании одних и тех же факторов. Основные принципы организации банка знаний следующие: персонализация моделей и факторов; непрерывность его обновления за счет изучения новых объектов и явлений; расширение описательных моделей графическими образами и содержательными выводами, включая создание для эксперта видеографических средств «рисования».

Информационно-вычислительные сети предназначены для предоставления пользователям возможности обмена сообщениями и передачи файлов. Во втором режиме пользователь осуществляет передачу файлов информации в базу данных, передачу пакета запросов в информационную базу и прием пакета ответов из информационной базы. В режиме обмена сообщениями пользователь оперативно удовлетворяет информационную потребность из соответствующей базы данных с целью принятия обоснованных решений.

Наиболее массовым элементом информационно-вычислительной сети является полностью автономная система обработки данных на персональном компьютере. Нижний уровень в иерархии сетей представлен локальной сетью, которая способна функционировать полностью автономно и поддерживать эффективную связь между элементами сети, как правило, с использованием каналов связи и программной поддержки. Другими словами, в локальной сети сочетаются преимущества автономного распределения обработки информации с возможностями индивидуального доступа к общим информационным ресурсам горного предприятия и горно-промышленного региона. Коллективное пользование информационными ресурсами позволяет сохранить время и эффективно использовать ресурсы средств вычислительной техники.

Многообразие задач, требующих решения при освоении недр, является причиной значительных трудностей, возникающих при создании автоматизированных и экспертных систем, обслуживающих одновременно несколько предметных областей и имеющих различные масштабные уровни. Такое положение вынуждает специализироваться, как это делают в геологии, либо по объектам, либо по стадиям и задачам, соответствующим профессиональным интересам (картирование, поиск, подсчет запасов и т.д.). Для геофизиков обычно характерна специализация по методам и задачам прогноза, для горняков – по роду деятельности и технологическим процессам.

У каждого специалиста формируется специальный объем знаний, который при наличии АРМ (автоматизированное рабочее место) позволяет расширить потенциальные возможности пользователя при подготовке альтернативных решений. Совершенствуя формализацию при решении сложных задач, АРМ позволяет повысить эффективность деятельности автоматизированных экспертных систем.

АРМ в зависимости от вида входящих в них программных комплексов подразделяют на проблемно ориентированные и объектно ориентированные. Те и другие могут работать как независимо (стационарно или с установкой на передвижных средствах), так и с любыми другими более мощными вычислительными комплексами. Как правило, модели АРМ комплектуются ПЭВМ и содержат накопители на магнитном диске, устройство печати, дисплеи и т.д.

Слежение за состоянием и параметрами горного объекта может осуществляться на различных масштабных уровнях: от региона до эксплуатационного забоя. Это определяет использование ИИС и ИВК различной вычислительной мощности и комплектации.

В качестве технических средств передачи данных используют аппаратуру передачи данных (АПД) – модемы в телефонной сети, устройства преобразования сигналов (УПС) в телеграфной сети и сети передачи данных, а также устройства сопряжения аппаратуры передачи данных с ЭВМ (адаптеры, мультиплексоры передачи данных). Эти средства обеспечивают соединение пользователей с удаленными базами данных, обмен информацией между базами данных и между собой.

Важнейшим элементом являются программные средства, которые представляют собой совокупность методов, алгоритмов (математических, эвристических, экспериментальных) и программ решения на ЭВМ задач обработки, анализа и интерпретации данных с целью выработки оптимальных решений по управлению процессами, производством и освоением недр в целом. Качество используемых алгоритмов проверяется результатами моделирования и анализа, практическим путем. Любая автоматизированная система обработки данных (АСОД) включает пакеты прикладных программ, которые, в свою очередь, представляют собой комплексы программ, ориентированные на решение конкретного класса задач.

#### 3.4.4. Информационные технологии

Информационную (компьютерную) технологию в общем виде можно определить как последовательность циклов процедур: сбор первичной информации и ее преобразование; комплексная интерпретация результатов; построение модели объекта; обращение (в некоторых случаях) к банку эталонных моделей и принятие альтернативных научных, технических или управленческих решений, связанных с освоением недр; переход к следующей стадии исследований, производства или сбора информации. Компьютерная технология обеспечивает непрерывность изучения объекта с помощью программных средств и средств вычислительной техники при реализации итерационной последовательности указанных выше процедур.

Основные задачи собственно компьютерной технологии следующие: сокращение объемов и сроков работ за счет приближения к достоверному описанию объекта по кратчайшему пути; оптимизация комплекса методов наблюдений, измерения и контроля; рациональное размещение мест сбора информации.

В техническом отношении информационная технология должна быть обеспечена соответствующими средствами – цифровыми регистрирующими системами по сбору информации, вычислительными комплексами и автоматизированными рабочими местами по первичной обработке данных, автоматизированными системами и комплексами, сетью передачи данных.

Первый этап компьютерной технологии включает в себя: сбор информации, зафиксированной на цифровых, аналоговых и бумажных (журналы) носителях; хранение информации, главным образом, на магнитных носителях с первичной обработкой на базе АРМ; обмен информацией через систему сетей при выполнении работ по комплексному изучению недр и производства, контролю за освоением георесурсов на региональном уровне и в пределах локальных объектов изучения и исследования.

Второй этап информационных технологий включает в себя: построение моделей объектов по результатам комплексной интерпретации данных; создание банка эталонных моделей (наиболее близких созданных аналогов), сравнение моделей и эталонов и принятие решения о дальнейших работах (проведение до-

полнительных работ или их прекращение); проектирование следующей стадии на основе моделей объекта, полученных на предыдущей стадии (подстадии); корректировка модели объекта в ходе текущей стадии и адаптивное управление процессом освоения георесурсов.

Комплексный и разнопараметровый характер горной информации обуславливает необходимость использования системного анализа при обработке и интерпретации данных, а сложность и многоуровневость представления информации – необходимость применения интегрированного системного анализа (ИСА), методология которого основана на исследовании операций, теории принятия статистических решений и управления. На их основе создают объемные многофакторные модели и принимают управленческое решение.

Постоянное пополнение информации позволяет корректировать модели изучаемых объектов, дополнять и улучшать выбор альтернативных решений. В горной информатике компьютерные технологии сопровождаются предметно ориентированным контролем, отслеживающим состояние объектов по различным факторам. В связи с этим проводятся: раннее обнаружение и предупреждение опасных горно-геологических явлений; оценка соответствия параметров состояния каждого горного объекта проекту; заблаговременное выявление различных видов геологических неоднородностей в осваиваемом подземном пространстве; поддержание в оптимальном режиме взаимодействия с породным массивом рабочего органа горной техники и т.д.

В горной информатике получают все более широкое распространение методы так называемых ГИС-технологий.

Традиционно ГИС состоит из трех элементов: I – программный продукт; II – технические средства, реализующие на ЭВМ высокую информационную технологию; III – базы и банки данных, программное обеспечение для решения конкретных задач и экспертно-консультационной деятельности.

ГИС-технология позволяет проводить комплексный анализ исходной информации, полученной в результате наземных и аэрокосмических исследований и представленной в виде геологических, тектонических, структурно-формационных, металлогенических и других карт.

В последние годы появились предпосылки для создания интегральных геоинформационных систем (ИГИС) глобального плана. Среди проектов создания ИГИС особое место занимают разработки НАСА (США) по ряду опытных проблемно ориентированных систем данных о климате, океанах, суше и планетах. Кроме того, в соответствии с программой ООН по окружающей среде создается база данных о глобальных ресурсах. Эти опытные системы являются основой создания Системы научной и прикладной информации НАСА, которая должна объединить функционирующие информационные системы, в том числе систему данных о суше.

Для информационного обеспечения государственных органов создают отраслевые и межотраслевые базы данных по минерально-сырьевым ресурсам

страны и Мирового океана, базы данных региональных исследований, глубинного строения, разведочной геофизики.

Геоинформация сети межотраслевых и отраслевых банков данных представляет собой неотъемлемую часть национальных информационных ресурсов. Их назначение – обеспечение необходимой информацией широкого круга специалистов различных отраслей и ведомств при решении фундаментальных и прикладных задач в науках о Земле, геоэкологии, прогноза катастрофических природных явлений и охраны недр.

Общесистемные задачи глобального контроля геологической среды отвечают трем последовательным этапам единой системы:

- 1) установление экологически сбалансированного потенциала геосреды;
- 2) природоохранительная оценка использования геосреды;
- 3) экономическая оценка использования геосреды.

Уже в 80-е годы начали создавать государственные системы контроля геологической среды по наиболее важным элементам геоэкологии: системы мониторинга подземных вод, экзогенных геопроцессов; радио экологического мониторинга; геохимического контроля состояния геолого-почвенных условий и др. Эти системы базируются на специализированных наблюдениях и банках данных. За рубежом во многих странах уже действуют системы учета и оценки баланса ресурсов полезных ископаемых, водных балансов на основе ведения государственных кадастров.

Региональные подсистемы обеспечивают проведение работ по комплексному изучению и использованию (контроль разработки) месторождений во всех регионах страны.

#### 3.4.5. Горное предприятие как информационный объект

Объектами математического моделирования при автоматизированном планировании и проектировании, например, открытых горных выработок являются: месторождения полезных ископаемых, представляющие собой совокупность геохимических и геотектонических полей, в пределах которых условно выделены контуры залежей, рудных тел и пластов, пригодных к разработке; рельеф участка местности, в пределах которого располагаются карьерное поле и горный отвод; открытые и подземные горные выработки; отвалы, насыпи и прочие техногенные образования, различные сооружения; транспортные и прочие коммуникации; зоны воздействия на окружающую среду; зоны ограничения и т.д.

Исходной информацией для математического моделирования объектов горных предприятий служат геологические, топографические и гипсометрические планы, вертикальные и горизонтальные сечения, данные опробования геолого-разведочных скважин, аэрофотосъемки и т.п. Хотя данные по разведочным скважинам являются первичной неискаженной информацией, математическое моделирование месторождений на их основе иногда чрезвычайно сложно и не всегда достаточно точно. Основная трудность заключается в интерпретации геоло-

гических закономерностей, которые не всегда поддаются математическому описанию.

Разрезы и планы позволяют наглядно представить формы залежей месторождения, их мощность, углы падения, глубину залегания, геологическое строение, размещение полезных компонентов, а также являются необходимым традиционным материалом для проектирования технологии разработки месторождения полезного ископаемого.

Графические модели, т.е. геологические профили и планы, легче преобразуются в математические модели, но переносят в них все свои погрешности. Повышение точности моделирования может быть достигнуто в ряде случаев при совместном использовании графических моделей и данных о скважинах. По последним уточняют распределение качественных признаков внутри контуров рудных тел или сортовых блоков, построенных на основе поперечных сечений или погоризонтных планов.

Геометрия рельефа основывается на представлении о земной поверхности как о поле высот, графическим изображением которого служит карта в горизонталях.

В результате производства открытых горных работ в недрах земли образуется выработанное пространство (карьер), заключенное между двумя топографическими поверхностями – естественной топографической поверхностью участка горного отвода и искусственной (результатом производства горных работ). Результаты моделирования месторождений и их открытой разработки могут быть представлены в цифровой, табличной или графической форме различного вида в зависимости, главным образом, от назначения модели, необходимой точности моделирования и вида исходной информации.

В задачах математического моделирования и оптимизации, решаемых в системах автоматизированного проектирования и конструирования, различных природно-технологических несложных технических объектов, таких как горные предприятия, строительные сооружения (газопроводы и прочие транспортные коммуникации, водохранилища, погрузочно-транспортные комплексы и др.), рассматриваются не только геометрические параметры объектов (линейные размеры, площади, объемы), но и их качественные характеристики. Кроме того, многие объекты являются динамическими, изменяющимися во времени и пространстве как форму, так и показатели качества.

Трудность создания единого информационного массива для заданного объекта проектирования заключается не только в том, что почти все виды информации горного производства характеризуются сложной структурой с несколькими иерархическими уровнями, но и в значительной неопределенности и изменчивостью во времени. Тем не менее создание единого информационного массива возможно, если информацию различного вида представить в форме единичных показателей, хотя и характеризующихся различными признаками качества, но привязанных в форме точек к единым координатам пространства и времени.

Первичным информационным элементом системы в трехмерных координатах такой базы является точка, принадлежащая любому контуру на вертикальной, горизонтальной или наклонной плоскости, секущей систему трехмерных координат, и имеющая следующие параметры: координаты, определяющие местоположение точки в данной системе; признаки (идентификаторы) качества, определяемые в зависимости от принадлежности точки к тому или иному множеству точек (например, в описании месторождений полезного ископаемого – это сорт руды, содержание того или иного компонента; в описании транспортных коммуникаций – назначение отрезка трассы дороги, ее вид и т.д.); вектор, характеризующий направление и дальность перемещения точки; скорость непрерывного или дискретного перемещения точки; время, характеризующее срок и длительность перемещения точки. Таким образом, каждая точка системы может характеризоваться несколькими параметрами, которые определяют местоположение точки в системе в данный момент времени и характеризует ее свойства.

Моделирование угольных месторождений заключается прежде всего в цифровом представлении разделительных поверхностей между угольными пластами и смещающими породами, т.е. планов изогипс кровли и почвы пластов, планов изомощностей, планов зольности и т.п. Основой математических моделей является точечно-цифровая информация – либо первичная, т.е. данные разведочных скважин, либо вторичная, снимаемая в виде массива координат точек с гипсометрических планов или геологических разрезов.

На этом принципе, по существу геоинформационном, основано большинство математических моделей угольных месторождений. Реализация этих моделей при проектировании и планировании горных разработок и стыковка с геоинформационными картографическими, геологическими, экологическими системами развивается по мере оснащения геологоразведочных организаций и горных предприятий современной вычислительной техникой, включая дигитайзеры, плоттеры, сканеры и др.

При моделировании транспортных коммуникаций их трассу в трехмерном пространстве представляют в виде прямых или криволинейных отрезков, на соединении которых выделяют характерные точки, разделяющие отрезки с разными уклонами, кривизной, различной конструкцией, назначением, т.е. отличающиеся признаками качества. Массив этих точек позволяет характеризовать в трехмерном пространстве сложную конструкцию системы карьерных транспортных коммуникаций как в ее статике, так и в динамике.

При моделировании рельефа, отвалов, хвостохранилищ, различных поверхностных сооружений характерные точки являются базой изолиний рельефа, линий пересечения выемок и насыпей с поверхностью земли, различных ограничивающих зон (взрывоопасной, санитарно-защитной, разноса пыли при сдувании ее с отвалов, осаждения частиц выброса из дымовых труб и т.д.).

При моделировании технологических процессов, например функционирования погрузочно-транспортного комплекса, точечный принцип позволяет опи-

сывать процессы погрузки, перемещения, разгрузки и прочие операции. Например, точка, представляющая в математической модели экскаваторный забой, помимо пространственной характеристики дает информацию о направлении и скорости перемещения забоя, качестве горной массы (сорт руды, вид вскрыши) и др.

Таким образом, для горной информатики, в отличие от геофизической и геологической, характерны: сравнительно небольшие размеры объектов (в плане – от сотен метров до нескольких километров, в глубину – от десятков до сотен метров), что обуславливает использование графических материалов, имеющих масштабы от  $1 \div 100$  до  $1 \div 25\ 000$ ; учет в качестве определяющих факторов не только природных (геологические характеристики, параметры ландшафта и т.д.), но и технических факторов, характеризующих горные выработки, транспортные коммуникации, комплексы горнотранспортного оборудования, а также экологических, в частности размеров месторождения и зон воздействия на окружающую среду; необходимость моделирования процессов перемещения горных выработок, движения транспортных средств по железным и автомобильным дорогам и других динамических и временных параметров.

Вычисления объемов, полей структур и других элементов в горной информатике имеют в своей основе математические операции с точками, а применяемые математические модели относятся к различного вида дискретным и дискретно-аналитическим. Математический аппарат, используемый для расчетов линий, площадей, объемов и решения различных практических горно-геометрических задач в трехмерном пространстве, представленном массивом точек, несложен и основан на понятиях, формулах и методах аналитической и дифференциальной геометрии.

Однако в приложении к горной информатике возникает необходимость учета того обстоятельства, что любая точка, как исходная, так и искомая, характеризуется не только пространственными координатами, но также индикаторами качественных признаков. Кроме того, математические модели должны быть ориентированы на использование вычислительных средств, электронных банков данных, а также на необходимость и возможность использования графических форм представления информации и оперативного преобразования графической формы в числовую и наоборот. С учетом этих, а также ряда других специфических требований, определяемых условиями конкретных задач, создают различные информационные модели месторождений полезных ископаемых, горных разработок и других объектов. При этом происходит развитие существующих и разработка новых математических методов и приемов, исследование аспектов формирующейся теории горно-информационного математического моделирования.

В 70–80-е годы в ходе интенсивных работ по созданию систем автоматизированного проектирования карьеров для угольной промышленности, черной и цветной металлургии, горно-химической промышленности исследовательскими группами В.М. Аленичева, Д.Г. Букейханова, В.В. Квитки, М.Н. Сивкова,

И.Б. Табакмана, А.С. Танайно и других был создан ряд математических моделей, основанных на дискретном представлении информации о месторождениях полезных ископаемых и горных работах. В этих моделях источниками информации являются данные о скважинах, снимаемые путем цифрового кодирования, а также данные планов и геологических профилей.

Геоинформационный подход позволяет использовать совместно как первичную исходную информацию (данные о скважинах и результаты других измерений), так и вторичную, т.е. графические материалы (геологические разрезы, планы и др.), и тем самым создает условия для получения более достоверных решений, а также намного снижает трудоемкость и повышает оперативность подготовки исходных данных для компьютерных систем, что является непременным условием для их широкого практического использования.

#### 3.4.6. Перспективные направления исследований в горной информатике

В горной информатике можно выделить три основных направления в области применения средств вычислительной техники при решении научных и технических проблем: вычислительный эксперимент; информационно-вычислительные сети и банки данных; автоматизированные проблемно ориентированные информационные системы.

Область применения методов вычислительного эксперимента в исследованиях и решении задач освоения недр чрезвычайно широка: моделирование процессов обогащения и горного давления; моделирование газодинамических явлений и процессов взрывного разрушения пород; экономико-математическое моделирование деятельности горных предприятий и т.д. Эффективность применения методов вычислительного эксперимента высока при получении новых научных знаний, особенно в тех условиях, когда физическое моделирование и натурный эксперимент затруднены или невозможны.

В области вычислительного эксперимента в России получены результаты, сопоставимые с мировым уровнем, например: при анализе подготовительной и газодинамической стадии внезапных выбросов; при расчете устойчивости горных выработок и бортов карьеров; при моделировании горных ударов и процессов взрывного разрушения, расчете сдвижения горных пород, имитационном моделировании технологии подземной добычи руды и др.

С появлением новых поколений компьютеров, отличающихся высокой производительностью, продуктивность исследований, основанных на применении методов вычислительного эксперимента, будет возрастать.

Информационно-вычислительные сети, банки данных и базы знаний обеспечивают коллективный доступ ученых, специалистов различных организаций, учреждений и предприятий, их структурных подразделений к техническим и программным ресурсам, а также оперативный обмен информацией, выход во внешние сети, включая мировые базы данных и базы знаний. Информационно-

вычислительные территориально распределенные сети представляют собой мощное средство междисциплинарного общения ученых. Они приобретают важнейшее значение для горных наук, отличающихся именно междисциплинарным характером.

Перспективным является создание единой методологии и компьютерной технологии построения автоматизированных информационных систем, ориентированных на различных пользователей: исследователей, руководителей отраслей и предприятий, геологов, маркшейдеров, экспертов. Возможность создания такой методологии предопределяется информационным подобием многих задач, возникающих на разных стадиях изучения и эксплуатации месторождений, оценки освоения недр. При этом чрезвычайно продуктивно использование современных геоинформационных систем, позволяющих создавать сложные многофункциональные системы с картографическим интерфейсом, например, для планирования горных работ и прогнозирования горногеологических условий при подземной добыче угля, для экологической экспертизы горно-промышленного региона, решения задач оптимизации разрушения горных пород на карьерах, создания банка данных цифровой картографической информации по планам развития работ на горных предприятиях России с передачей информации по телекоммуникационным сетям и др.

Особую важность приобретает горная информатика с использованием ГИС-технологий при оценках последствий горного производства на окружающую природную среду и решении задач горной экологии, в частности, в составе литомониторинга, мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, почв и водных источников.

Положение дел в области горной информатики в России характеризуется отставанием от мирового уровня (в большинстве случаев значительным) по многим направлениям. Так, например, за последние 15–25 лет в мире разработаны специализированные интегрированные компьютерные системы для моделирования месторождений, решения задач проектирования и планирования горных работ с применением аппарата геостатистики. К наивысшим достижениям в этой области следует отнести системы DAT AMINE (Великобритания), TECHBASE (США), GEOSTAT (Канада). Характерной особенностью указанных систем является доведение их до «коммерческого» вида. Эти системы распространены по всему миру и установлены в том числе и в нашей стране.

Взаимосвязь горной информатики со смежными областями научных знаний определяется тем, что геоданные, получаемые в сфере геофизики, геологии, топографии, геохимии и представленные в геоинформационном виде, используются в информационном и программном обеспечении геологоразведки, освоения георесурсов, в решении экологических и других задач. Таким образом, горная информатика является составной частью горных наук, связывая их единой информационной базой с геофизикой, геологией, геодезией, геохимией, гидрогеологией и другими науками о Земле.

Особым вопросом является взаимоотношение между горной информатикой и геостатистикой. Последняя, как направление в науках о Земле, зародилась раньше (в 50–60-х годах) и получила за рубежом значительное теоретическое развитие и широкое практическое применение. Сейчас, когда проблема эффективного использования дорогостоящей геологической информации, особенно результатов эксплуатационной разведки и опробования, приобрела актуальность, геостатистика должна найти значительно более широкое практическое применение в горном деле.

Поскольку основным объектом геостатистики является собственно само месторождение полезных ископаемых и особенно пространственное распределение компонентов в рудных телах, то геостатистика может рассматриваться как раздел или составная часть геоинформатики и горной информатики, предмет которых более обширен и включает не только геологические условия, но и ландшафт, техногенные геологические образования, экологические, а также технические и технологические факторы. По мере развития этих научных направлений основные положения геостатистики и геоинформатики будут, вероятно, все больше дополнять друг друга, а в практическом приложении будут объединяться в автоматизированных системах различного назначения.

Среди перспективных научных направлений горной информатики необходимо выделить следующие:

- формирование и развитие научных представлений о неопределенности, как об одной из основных характеристик научных выводов, технических, управленческих и других решений в горном деле, а также о структуре неопределенности, слагающих ее элементах и влияющих на нее факторах, свойственных специфике явлений и поведения природных и техногенных объектов при освоении недр;

- развитие научных представлений различной степени общности об информационных признаках явлений и поведения объектов с позиций обеспечения необходимой достоверности выводов и решений;

- установление закономерностей формирования и развития проблемно ориентированных систем информации;

- выявление условий формирования в информационных системах освоения недр зон информационного «вакуума» – причин зарождения и реализации техногенных катастроф;

- повышение эффективности использования и создание новых высокоэффективных, автоматизированных горно-информационных методов наблюдения, измерений и контроля с различной дальностью действий, высокой точностью и разрешающей способностью на различных уровнях наблюдений (наземный, подземный и скважинный);

- создание горно-информационных моделей ландшафта, источников георесурсов, техногенных образований и горных объектов как природно-технологических комплексов, а также методов математического моделирования, адекватных современным требованиям и средствам переработки информации;

- создание теоретических основ горно-информационных автоматизированных банков данных, преимущественно реляционного типа, обслуживающих в горном деле автоматизированные системы управления, проектирования, прогнозирования и мониторинга различного назначения, в том числе экологического;

- создание новых информационных технологий для решения задач освоения недр различного типа на основе их информационного подобия;

- развитие моделирования процессов и функционирования геосистем, особенно имитационного моделирования, в режиме реального времени;

- совершенствование технических и программных свойств горной информатики и создание автоматизированных самообучающихся человеко-машинных систем, работающих в диалоговом режиме, обладающих возможностями генерирования гипотез развития геосистем;

- разработка, научных основ системной организации горно-информационного механизма (ГИМ), которая давала бы возможность получения целостного знания о закономерностях эволюции системы «недра Земли – человек – общество», а также создание методов математического моделирования функциональной структуры и взаимодействия факторов, определяющих объект ГИМ, количественная оценка эффективности ГИМ, его оптимального функционирования с учетом системных свойств, в частности организованности и адаптивности, структурный и параметрический синтез ГИМ, т.е. оптимальное распределение функций по его частям и взаимодействию между ними;

- исследование и обоснование методов компьютерного картирования недр для всех стадий разведки и эксплуатации месторождений, источников георесурсов;

- создание баз данных и баз знаний по различным типам многофакторных моделей горных объектов (процессов) с обеспечением долговременного их хранения и накопления;

- разработка систем передачи информации и обмен данными между источниками их получения и потребителями;

- построение пакетов прикладных программ по петрофизическому, физико-геологическому, маркшейдерско-технологическому и другим видам многофакторного моделирования, разработка на их основе автоматизированных систем.

Обоснованность и своевременность принятия решений для каждой конкретной задачи – главные критерии оценки качества используемых информационных технологий. В этих противоречивых требованиях заложены условия прогресса горной информатики, которая должна постоянно совершенствовать технические средства наблюдений, измерения и контроля, ЭВМ и программные средства обработки информации, способы оперативной и качественной передачи ее по каналам связи, моделирование и математические методы решения задач, способы интеграции, агрегации и анализа информации.

### Список литературы к разделу 3.4

1. *Ширяев Е.Е.* Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. – М.: Недра, 1984.
2. *Кашкарев А.В., Тикунов В.С.* Геоинформатика / под ред. Д.В. Лисицкого. – М.: Картогеоцентр и геодезиздат, 1993.
3. *Трофимов А.М., Панасюк М.В.* Геоинформационные системы и проблемы управления окружающей средой. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984.
4. *Хохряков В.С.* Проектирование карьеров: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1992.
5. *Кузнецов О.Л., Никитин А.А.* Геоинформатика. – М.: Недра, 1992.
6. *Миронов О.К.* Развитие геоинформационных технологий в ВИЭМСе // Разведка и охрана недр. – 1995. – № 8.
7. Геоинформационная плотность математических моделей горного предприятия / *В.С. Хохряков [и др.]* // Изв. вузов. Горный журнал. 1990. – № 9. – С. 14–20.
8. *Капутин Ю.Е., Ежов А.И., Хенли С.* Геостатистика в горно-геологической практике. – Апатиты: Кольский науч. центр РАН, 1995.
9. Автоматизированное проектирование карьеров: учеб. пособ. для вузов / *В.С. Хохряков [и др.]*; под ред. В.С. Хохрякова. – М.: Недра, 1985.
10. Информационное обеспечение геолого-маркшейдерской службы / *В.И. Дремов [и др.]* // Изв. вузов. Горный журнал. – 1995. – № 3. – С. 46–49.
11. *Ершов А.П.* Информатика: предмет и понятие // Становление информатики. – М.: Наука, 1986.
12. *Потресов Д.К.* Информационный механизм управления в горном производстве. – М.: Изд-во МГИ, 1993.
13. *Хохряков В.С., Корнилков С.В., Вернер А.Н.* Геоинформационная характеристика горно-геометрических данных для использования средств машинной графики // Изв. вузов. Горный журнал. – 1992. – № 9.
14. *Певзнер Л.Д.* Теория систем управления: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2002. – 472 с.
15. *Шек В.М.* Объектно-ориентированное моделирование горнопромышленных систем. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2000. – 304 с.
16. *Бахвалов Л.А.* Моделирование систем: учеб. пособие. Ч. 1. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. – 265 с.
17. *Федунец Н.И., Куприянов В.В.* Теория принятия решений: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. – 218 с.
18. *Резниченко С.С., Ашихмин А.А.* Математические методы и моделирование в горной промышленности: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2001. – 404 с.

#### 4. ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

**Геотехнология – это комплекс горных наук (физико-техническая, физико–химическая и строительная геотехнологии, геотехника) об извлечении полезных ископаемых из недр и водоемов или использовании георесурсов тех видов, утилизация которых не предполагает их извлечения (например, подземные полости).**

Объединяющей идеей группы наук «Геотехнология» является выявление научных предпосылок для технических решений, расширяющих и углубляющих функциональные возможности горных предприятий и преобразования недр в целом. При этом в качестве теоретической базы могут быть приняты положения о ресурсовоспроизводящих функциях и подобных же технологиях горного производства.

Горные науки этой группы сопряжены с теорией создания и эксплуатации разнообразной новой горной и транспортной техники, поэтому решение проблем машиностроения, автоматизации, энергетики, управления производственными процессами способствует развитию горных наук группы «Геотехнология».

**Предмет геотехнологии** составляют взаимосвязи технологий, процессов, технических средств, технологических конструкций техногенных сооружений и породно-минеральной среды, изучаемые с целью изыскания наиболее безопасных, экологически приемлемых и экономически выгодных способов эксплуатации минеральных ресурсов. Геотехнология охватывает наиболее общие знания в области использования ресурсов недр. Она является своеобразным началом других горных наук, большинство из которых образовались «внутри» геотехнологии и ныне развиваются в связи с потребностью совершенствования горных технологий, процессов и технических средств. С накоплением знаний происходит естественное отпочковывание и формирование самостоятельных, смежных с геотехнологией наук со своими объектами изучения, средствами и методами исследований.

**Объекты изучения геотехнологии** – технологии, процессы и технические средства – предназначаются для использования в земной толще, т.е. в некоторой твердой минеральной среде, и в этом заключается их основная особенность. Для этой среды характерны отсутствие сплошности, анизотропность, изменчивость физических и других свойств в пространстве, наличие внутри нее веществ в жидком и газообразном состоянии. Действие физических законов в твердой среде существенно отличается от их проявлений в других средах (газовоздушной, жидкостной, однородной твердой), где с гораздо большей определенностью возможно прогнозирование, развитие тех или иных явлений и процессов. Поэтому в геотехнологии, как правило, закономерности и зависимости устанавливаются при остром дефиците достоверной информации об условиях, в которых будут протекать физические и химические процессы, функционировать технологии и технические средства. Это свидетельствует не только о сложности вы-

явления объективных геотехнологических взаимосвязей, но и об особенностях этой науки, а также о необходимости дальнейшего развития средств и методов исследований. На современном этапе в геотехнологии основными методами остаются вероятностно-статистические, физическое, математическое и аналоговое моделирование, технико-экономический анализ. Наиболее интенсивно геотехнология стала формироваться как наука именно с развитием вероятностно-статистических и других методов исследования операций.

Составные части геотехнологии – физико-техническая, физико-химическая и строительные технологии, а также геотехника – как научные направления формируются на базе определенных производств, технологий и процессов.

#### **4.1. Физико-техническая геотехнология**

Физико-техническая геотехнология сформировалась как совокупность знаний о способах и взаимосвязи процессов извлечения полезных ископаемых из недр или техногенных образований без изменения химического состава исходного сырья и его агрегатного состояния. Являясь самостоятельным разделом горных наук, она развивается под влиянием все возрастающих потребностей общества в добыче полезных ископаемых из недр Земли. В настоящее время горнодобывающей промышленностью из недр извлекается уже свыше 200 наименований полезных ископаемых. Горные работы ведутся на глубине до 3,5 тыс. м от поверхности.

Значимость физико-технических геотехнологий для общества и необходимость фундаментальных и прикладных исследований обусловлены широкими масштабами и сложностью технологий современного горного производства, ведущегося как в недрах Земли, так и под толщей морей и океанов с использованием взрывных работ и мощной техники, при огромном разнообразии природных условий месторождений, повышенной опасности производства для работающих, экологических воздействиях на окружающую среду. В этих условиях достижение поставленной цели исследований невозможно без выявления, теоретического и экспериментального изучения многих закономерностей и их научного обобщения, т.е. без проведения фундаментальных исследований. С другой стороны, физико-техническая геотехнология имеет дело с большим объемом прикладных исследований, а иногда и опытно-промышленных испытаний, обусловленных необходимостью учета специфики отдельных месторождений или их групп при проектировании технологии добычи полезного ископаемого.

**Объекты изучения физико-технической геотехнологии** – горные предприятия (карьеры, шахты, рудники, прииски и др.), технологические процессы открытой, подземной, подводной, скважинной и комбинированной разработки месторождений твердых полезных ископаемых, горные выработки и инженерные сооружения технологического и вспомогательного назначения.

**Цель исследований физико-технической геотехнологии** – установление взаимосвязей между условиями залегания полезных ископаемых в недрах и спо-

способами их извлечения, способами сохранения недр для последующего использования, а также установление закономерностей изменения параметров технологических процессов в динамике развития горных работ.

**Главная задача** – создание научных основ эффективных, безопасных и экологически сбалансированных технологий и способов освоения георесурсов недр Земли.

**Основными научными направлениями** физико-технической геотехнологии в процессе ее развития как комплекса наук стали:

- изыскание способов доступа к месторождениям полезных ископаемых (вскрытие месторождений);
- исследование горно-геологических и горнотехнических условий месторождений и создание теоретических основ систем их разработки;
- исследование закономерностей функционирования основных технологических процессов горного производства и формирование на их основе циклических, циклично-поточных и поточных технологий горных работ;
- обоснование параметров горных выработок и способов их поддержания в процессе эксплуатации с учетом физико-механических свойств горных пород, их напряженно-деформированного состояния (НДС) и техногенных воздействий (технология управления НДС массива);
- исследование режимов горных работ и обоснование последовательности и интенсивности разработки месторождений;
- разработка систем управления горными предприятиями и технологическими процессами.

За последние десятилетия достижения физико-технической геотехнологии связаны с созданием научных основ развития и совершенствования современных и разработки новых физико-технических технологий добычи полезных ископаемых и комплексного освоения минеральных и других ресурсов месторождений. Изучены минерально-сырьевая база и территориальное размещение месторождений, горно-геологические характеристики условий залегания полезных ископаемых и свойств горного массива, определены направления комплексного освоения георесурсов, способы и системы разработки, системы вскрытия и подготовки месторождений к эксплуатации.

В результате создана методология установления:

- рациональных условий и области применения открытого, подземного, подводного и комбинированного способов разработки, комплексного освоения георесурсов, а также параметров систем вскрытия, подготовки к эксплуатации и разработки пластов, залежей и других минеральных скоплений;
- рациональных технологических схем управления состоянием массива, геодинамическими и газоаэродинамическими явлениями для безопасных и комфортных условий труда;

– рациональных технологических процессов, параметров эксплуатации и развития систем вскрытия, подготовки и разработки месторождений, схем применения технических средств.

**Физико-техническая геотехнология** как наука в своем развитии опирается на достижения в области естественных наук (геологии, физики, химии, механики и математики), технических (машиноведения, теории надежности, электродинамики), экономики и организации производства и включает в себя:

- **физико-техническую открытую геотехнологию;**
- **физико-техническую подземную геотехнологию;**
- **физико-техническую подводную (морскую) геотехнологию;**
- **физико-техническую комбинированную геотехнологию.**

По существу, физико-техническая геотехнология – это научный фундамент горно-инженерных знаний, необходимых для создания и эксплуатации горных предприятий, анализа и прогноза их деятельности, а также для оценки последствий горного производства. В физико-технических геотехнологиях и процессах используются взрывное, механическое, гидравлическое, криогенное, химическое, гравитационное и другие воздействия на горные породы. Они осуществляются при разрушении горных пород, укреплении и упрочении горных выработок и массивов, а также при перемещении отбитой горной массы. В результате производства горных работ в земной коре происходят структурные изменения и перераспределение силовых полей, в значительной мере зависящих от видов и параметров технологий и процессов горных работ.

При добыче твердых полезных ископаемых сложные и глобальные геотехнологические проблемы возникают в связи с извлечением из недр и перемещением на поверхность Земли колоссальных объемов горных пород с дезинтеграцией их структуры, образованием техногенных открытых и подземных пространств. В этих условиях неуправляемое развитие горных работ, рост их объемов без надежного научно-технического обоснования чреват весьма серьезными последствиями.

В процессе горных работ стремятся к двум взаимно противоположным целям:

- 1) локально, в ограниченных контурах, разрушить массив горных пород с частичным или полным перемещением дезинтегрированной отбитой массы в выработанное пространство или за его пределы;
- 2) сохранить в устойчивом состоянии породный массив, окружающий контуры горных выработок и выработанного пространства.

Каждая цель определяет принципы технологий и процессов горных работ. По первому признаку горные технологии основываются на следующих способах разрушения: взрывной; машинный или инструментальный (резанием или скалыванием); гидравлический (размывом, резанием, отрывом, отделением по трещинам); терморазрушение (шелушением, плавлением, выжиганием).

Взрыв, являясь наиболее мощным, но и трудно управляемым физическим процессом, оказывает наибольшее влияние на все последующие производствен-

ные процессы и технологии горных работ в целом, предопределяя цикличность их выполнения, ухудшая устойчивость горных массивов и загрязняя атмосферу. Взрывное разрушение, как и другие методы дезинтеграции горных пород, изучается в соответствующем разделе горного недроведения, где объектами исследований являются действие взрыва в различных природно-минеральных средах, физика процесса разрушения, а также физико-химические аспекты процесса взрыва. В геотехнологии же рассматривается технологическая сторона процесса, а именно: конструкции, параметры, схемы коммутации взрывной сети; интервалы и последовательность взрывания зарядов взрывчатых веществ в увязке с параметрами систем разработки и с общей технологией горных работ. При этом ставят вполне конкретные технологические задачи – отделение руды или других пород по заданному контуру, их дробление в соответствии с размером кондиционных кусков, взрыводоставка рудной массы к выпускным выработкам и др.

В обозримом будущем взрывная отбойка в горном производстве, очевидно, по-прежнему, будет иметь доминирующее значение, особенно при разработке скальных пород, что определяет необходимость дальнейших научных исследований по изысканию путей нейтрализации отрицательных последствий взрывной отбойки крепких горных пород и созданию на этой основе новых технологий и процессов добычи полезных ископаемых.

Машинный способ отбойки, доминирующий в технологиях добычи угля, особенно подземной, за последние годы существенно расширил границы своего применения при разработке рудных месторождений. Это явилось следствием успешных исследований в области геотехники и создания на этой базе машин, комбайнов и разрушающего инструмента с лучшими показателями. Новые технические средства разрушения горных пород с повышенными усилиями резания, а также работающие по принципу скальвания, позволяют разрабатывать принципиально иные технологии добычи скальных пород. С созданием таких технологий будут более эффективно решать проблемы поточности, сохранения природной устойчивости массивов, уменьшения загрязнения атмосферы, сохранности кристаллов драгоценных камней и слюд, комплексной автоматизации горного производства в крепких породах. Решению этих проблем способствует также развитие других способов разрушения горных пород, в частности термических и гидравлических.

Сохранение законтурного породного массива от разрушения и обеспечение его устойчивости осуществляются путем использования внутреннего запаса прочности этого массива, крепления выработок, укрепления или упрочнения примыкающей к горным выработкам зоны массива, заполнения выработанных пространств породной закладкой или временно замаганизированной рудной массой, обрушения части горного массива, сохраняя тем самым целостность остальной его части. Каждая из этих технологий сопровождается определенными физическими и производственными процессами, требующими изучения в связи с горно-геологическими и горно-техническими условиями их протекания. При

этом физические процессы в толще горных пород исследуют методами геомеханики. В геотехнологии на базе этих исследований изучают горно-технологические аспекты проблем – обоснование способов управления устойчивости массива, технологию и параметры процессов их осуществления.

**Научные направления физико-технической геотехнологии** имеют свои объекты исследований, характеризующиеся главными, решаемыми при соответствующих способах разработки месторождений проблемами, общими из которых являются:

1. Максимальная экономическая эффективность горных технологий.
2. Наиболее полное, но экономически оправданное извлечение подлежащих выемке из недр запасов полезных ископаемых.
3. Обеспечение необходимого качества добытых полезных ископаемых в условиях систематического снижения его уровня в недрах из-за отработки наиболее качественных запасов.
4. Обеспечение максимальной безопасности горных работ.
5. Максимальное сокращение отрицательных экологических результатов деятельности горных предприятий с восстановлением нарушенного горными работами природного равновесия.
6. Сохранение в недрах не востребуемых запасов полезных ископаемых и других потенциально ценных георесурсов.
7. Использование выработанного пространства в промышленных и других хозяйственных целях.

#### 4.1.1. Физико-техническая открытая геотехнология

**Физико-техническая открытая геотехнология – раздел горных наук, обеспечивающий исследованиями развитие открытой (с поверхности Земли) разработки месторождений всех видов твердых полезных ископаемых путем сооружения комплекса горных выработок и производства вскрышных и добычных работ, а также развитие массовых земляных работ.**

Открытый способ разработки месторождений, как генеральное направление развития горнодобывающих отраслей отечественной промышленности на протяжении последних нескольких десятилетий, сохранит свои позиции и в обозримой перспективе благодаря в первую очередь основным преимуществам (по сравнению с подземным способом) экономического, технического, технологического, организационного и социального характера. В России в последние годы открытым способом ежегодно добывают около 90 % железной руды, 90 % горной массы, 62 % руд цветных металлов, 60 % угля, почти 100 % алмазосодержащих руд и сырья для производства строительных материалов.

Исследования в области открытой разработки месторождений полезных ископаемых уходят в далекое прошлое. Однако современное направление горных наук, связанное с открытой разработкой, интенсивно начало развиваться только в 20-е годы прошлого столетия, когда стали появляться средства механизиро-

ванной выемки и транспортирования горной массы. Первые исследования этого периода были посвящены разработке методов научного обоснования целесообразной высоты уступов и определения эффективных границ карьеров. В 1924 году известный советский ученый, акад. Л.Д. Шевяков разработал положение по определению высоты уступа при транспортной системе разработки исходя из условий безопасности и технико-экономической целесообразности. Другой советский ученый М.И. Гоберман в 1927 году впервые начал проводить исследования по определению границ карьеров, основанные на принципе сравнения граничного и контурного коэффициентов вскрыши. Такой подход не утратил своего значения и сегодня.

В 20-х годах в связи с применением бестранспортных и транспортно-отвальных систем разработки (Челябинские угольные копи, Черемховское месторождение) были предложены методы расчета их основных параметров. В этот же период были заложены основы теории применения массовых взрывов скважинными зарядами и минными камерами.

В последующие годы начали формироваться научные школы Н.А. Старикова в СГИ, Е.Ф. Шешко в МГИ и др. Основные исследования проводились по наиболее трудоемкой в то время операции – буровзрывным работам. Значительные по объему исследования проводились в областях гидромеханизации, применения многочерпаковых экскаваторов и транспортно-отвальных мостов. Были созданы первые классификации систем открытой разработки (Е.Н. Барбот–де–Марни, Е.Ф. Шешко, Н.В. Мельников), разработаны и систематизированы различные схемы вскрытия.

Наиболее быстрое развитие открытых горных работ в СССР началось после окончания Великой Отечественной войны. Открытый способ разработки становится основным при добыче большинства видов полезных ископаемых. На базе выполненных в этот период научных разработок создаются проекты строительства крупных карьеров большой глубины, позволяющих обеспечить все возрастающие потребности страны в минеральном сырье путем применения бестранспортной системы разработки с мощными шагающими драглайнами, современных способов взрывания, применения автомобильного и комбинированного автомобильно-железнодорожного транспорта.

Научное обеспечение интенсивного развития открытой разработки месторождений полезных ископаемых базируется на широко проводимых исследованиях: физических, механических и других свойств горных пород и массивов и взаимодействия последних с рабочими органами горных машин для разрушения, выемки, погрузки, перевозки и складирования (отвалообразования) горной массы; теории создания и совершенствования высокопроизводительного горного (бурового, выемочного, транспортного) оборудования (обоснование прогрессивных видов, размеров и главных параметров техники); теории процессов вскрышных и добычных работ; теории проектирования главных параметров карьеров (их границ, производительности и др.), вскрытия место-

рождений и рабочих горизонтов карьеров, режимов и систем открытых горных работ.

Одним из важнейших предметов исследования в области открытой геотехнологии является управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на базе выявленных закономерностей перераспределения первоначальных напряжений и деформаций пород в зонах техногенного воздействия.

С развитием масштабов добычи полезных ископаемых открытым способом все большее значение приобретают научные проблемы обеспечения устойчивости конструктивных элементов систем разработки, уступов и откосов бортов карьеров, отвалов вскрышных пород. С использованием новых знаний о первоначальном напряженном состоянии массива пород установлено, что напряженное состояние массива формируется в результате перераспределения первоначальных напряжений вокруг карьерного пространства и определяется параметрами карьера, в том числе его размерами и формой. Взаимосвязь этих двух факторов (первоначальное напряженное состояние – форма и параметры карьера) открывает перспективу управления параметрами вторичного поля напряжений, а следовательно, и устойчивостью бортов карьеров путем задания специальной последовательности образования карьерного пространства, создания защитных и разгрузочных зон.

Создана теория формирования транспортных систем карьеров, которая является составной частью физико-технической геотехнологии и в значительной степени опирается на достижения геотехники. Предмет изучения этого направления открытой физико-технической геотехнологии – физико-механическая сущность процессов перемещения горных пород различными техническими средствами.

Учение о карьерном транспорте развивается как связующее звено технологических процессов добычи и переработки полезных ископаемых. Серьезные научные исследования в этой области начались лишь в 50–60-е годы, когда наладили промышленный выпуск нескольких типоразмеров карьерных автосамосвалов, локомотивов, думпкаров, конвейеров. Актуальными научными задачами в тот период были: определение рационального соотношения вместимости транспортного сосуда и ковша экскаватора; обоснование рациональных схем расположения в рабочей зоне карьера транспортных коммуникаций, схем маневров в забоях и т.п.

По мере развития карьеров и понижения горных работ встала задача обоснования рациональных условий применения различных видов карьерного транспорта в зависимости от высоты подъема и дальности транспортирования горной массы.

Значительным вкладом в создание научных основ формирования транспортных систем глубоких карьеров явилась разработка теоретических основ и методики сравнения и выбора видов карьерного транспорта. Приоритетными

направлениями исследований проблемы карьерного транспорта как технологического процесса открытых горных разработок являются: установление эффективных по энергетическим, экологическим и экономическим показателям областей применения основных видов транспорта в различных горнотехнических условиях; разработка методов учета экологических и экономических факторов при обосновании оптимальной последовательности формирования транспортных систем глубоких карьеров; изыскание технологических схем глубокого ввода железнодорожного транспорта на основе применения тяговых агрегатов и уклонов до 60 %; обоснование параметров технологических схем комбинированного транспорта с применением крутонаклонных (до 50°) конвейерных подъемников.

В 60–70-е годы прошлого века при интенсивном развитии открытого способа разработки железных руд и росте глубин ряда крупных карьеров возникла научная проблема перехода от цикличной технологии к поточной, успешно осуществленного, например, при разработке рыхлых пород. Препятствием к такому переходу была цикличная буровзрывная, технология отбойки больших объемов скальных горных пород от массива, в результате которой получали крупнокусковую горную массу, практически не пригодную для погрузки и транспортирования производительными машинами непрерывного действия. В этот период был проведен обширный комплекс исследований и созданы научные основы циклично–поточной технологии (ЦПТ) разработки скальных горных пород. При этой технологии сохраняется буровзрывная отбойка пород массива и их погрузка экскаваторами цикличного действия. Далее горная масса подвергается механическому дроблению непосредственно в карьере и выдается на поверхность средствами непрерывного транспорта (конвейерами).

В составе научных основ ЦПТ были разработаны: принципиальные технологические схемы ЦПТ и их классификация; состав комплектов оборудования для основных схем ЦПТ со стационарными, передвижными, самоходными дробильными и грохотильными агрегатами; способы вскрытия, проведения капитальных и подготовительных выработок, подготовки горизонтов, развития горных работ, размещения транспортных коммуникаций в карьерах и т.д.; методы ведения буровзрывных работ, обеспечивающие приемлемую для ЦПТ степень дробления горной массы при различных физико-механических свойствах пород; методика определения момента перехода от цикличной технологии к ЦПТ при реконструкции карьеров.

При активном участии машиностроительных институтов и заводов были обоснованы технические требования и создан ряд опытных образцов оборудования для ЦПТ, испытанных на ряде горных предприятий. Положительные результаты научно-исследовательских, конструкторских и опытно-промышленных работ позволили запроектировать и впоследствии реализовать ЦПТ на большинстве железорудных комбинатов бывшего СССР. Опыт применения ЦПТ показал, что своевременное внедрение ее на глубоких карьерах позволяет сократить за-

траты на транспортирование горной массы на 15–20 %, повысить производительность труда, снизить объем горно-капитальных работ и количество вредных выбросов в атмосферу.

Наиболее существенными научными достижениями последних десятилетий в области физико-технической открытой геотехнологии являются:

- теория вскрытия и систем разработки месторождений различных полезных ископаемых в разнообразных горно-геологических и природно-климатических условиях;

- теория формирования транспортных систем глубоких карьеров на основе одновременного или последовательного (во времени и пространстве) применения автомобильного, железнодорожного и конвейерного видов транспорта;

- научные основы применения циклично-поточной технологии разработки скальных пород и руд;

- расчетные методы определения оптимальных параметров современного мощного горного и транспортного оборудования и принципы формирования на их основе рациональных комплексов для различных горнотехнических условий;

- разработка и внедрение рецептур и технологии приготовления простейших горячельющихся водонаполненных и эмульсионных ВВ;

- разработка и применение на многих глубоких карьерах поэтапной разработки и других схем ведения горных работ с временной консервацией бортов и отдельных уступов.

Приоритетность ряда указанных выше научных исследований возрастает в условиях проведения экономических реформ, ресурсных, экономических и экологических ограничений.

**Основные направления научных исследований в области физико-технической открытой геотехнологии:**

- развитие теории комплексного освоения минеральных ресурсов недр Земли, включая разработку научных и методических положений по добыче и сохранению попутных полезных ископаемых, освоению запасов, находящихся за проектными контурами разработки, использованию техногенного минерального сырья и целенаправленному созданию техногенных минеральных образований, утилизации отходов добычи полезных ископаемых;

- разработка научных основ развития современных и перспективных карьеров, обеспечение их конкурентоспособности в условиях проведения экономических реформ, ресурсных, экономических и экологических ограничений при научном обосновании этапов реконструкции карьеров, параметров рабочей зоны и степени концентрации горных работ, новых ресурсосберегающих и ресурсо-воспроизводящих технологий, целенаправленного формирования выработанного пространства и использования его для внутреннего отвалообразования, эффективных транспортных схем и комплекса мер, обеспечивающих комфортные условия труда;

- развитие теории в области создания новых эффективных видов горного оборудования, применение которого позволит компенсировать объективное ухудшение условий разработки месторождений и снижение производительности;

- создание методологии обоснования границ и последовательности применения открытого и подземного способов при комбинированном их использовании для разработки месторождений;

- разработка научных основ создания новых ресурсосберегающих технологий извлечения георесурсов из недр открытым способом, обеспечивающих повышение полноты и качества их извлечения;

- развитие методологии оценки устойчивости откосов разрабатываемых горных массивов и техногенных горных объектов, включая развитие расчетных методов по определению устойчивости откосов, установлению механических характеристик массивов горных пород, критических величин смещений и их скоростей для различных инженерно-геологических комплексов, и обоснование технологических мер повышения устойчивости откосов бортов карьеров, уступов и отвалов;

- разработка научных основ создания ресурсосберегающих и экологически безопасных транспортных систем глубоких карьеров.

Перспективы дальнейшего прогресса физико-технической открытой геотехнологии и ее места в горных науках будущего тесно связаны с решением проблемы оптимизации взаимоотношений между человеком и природной средой. Особое значение для будущего человечества имеют разработки эффективных и в то же время экологически чистых технологий, не наносящих ущерба окружающей среде.

#### 4.1.2. Физико-техническая подземная геотехнология

**Физико-техническая подземная геотехнология – раздел горных наук, обеспечивающий исследованиями различные технологии добычи твердого минерального сырья посредством сооружения комплекса подземных выработок и производства подземных работ по извлечению полезного ископаемого.**

**Предметами изучения** этого раздела горных наук являются:

- вскрытие месторождений; технологические процессы извлечения георесурсов из недр; технологии управления напряженно-деформированным состоянием массива горных пород;

- способы управления газоаэродинамическими и пылевыми режимами в шахтах и рудниках;

- взаимодействие и взаимосвязи технологических процессов с состоянием массива горных пород и атмосферы подземного горнодобывающего предприятия; методы управления качеством добываемого минерального сырья.

**Целью физико-технической подземной геотехнологии** как раздела горных наук является установление объективных закономерностей и взаимосвязей между параметрами подземных выработок, последовательностью их формирования, технологическими процессами горных работ, экологической безопасностью и экономической эффективностью извлечения георесурсов из недр.

**Главная задача** ее состоит в выработке научно обоснованных рекомендаций, обеспечивающих надежность, безопасность и эффективность извлечения георесурсов из недр.

**Основные разделы подземной физико-технической геотехнологии:**

- теория вскрытия и подготовки месторождений полезных ископаемых;
- принципы обоснования порядка развития горных работ в шахтном поле;
- системы подземной разработки месторождений полезных ископаемых;
- научные основы формирования технологических схем рудников и шахт;
- теория процессов подземной добычи полезных ископаемых (отбойки, выпуска и доставки полезного ископаемого, управления состоянием массива горных пород, вентиляции, рудничного транспорта, подъема и др.);
- теория и методы организации управления производственными процессами добычи твердых полезных ископаемых при подземной добыче;
- физическое и экономико-математическое моделирование технологий и процессов подземных горных работ; квалиметрия и теория формирования качеств полезных ископаемых при подземной добыче.

Различия в горно-геологических условиях залегания рудных месторождений и пластовых месторождений угля, горючих сланцев и солей определили особенности развития направлений физико-технической подземной геотехнологии применительно к этим видам полезных ископаемых.

В области исследований технологий подземной добычи руд развитие физико-технической подземной геотехнологии связано с крупными достижениями в прогнозировании процессов сдвижения и обрушения руд и вмещающих пород, а также процессов истечения руды из обрушенных блоков. В сочетании с широкомасштабными исследованиями технологии взрывного разрушения эти работы послужили теоретической базой для создания систем разработки с массовым обрушением руды и вмещающих пород, что обеспечило радикальные преобразования в области разработки руд черных и цветных металлов, а также горно-химического сырья. Кроме того, на базе многочисленных экспериментов была разработана теория последовательного извлечения полезного ископаемого из очистного пространства под действием силы тяжести, а также изучены его разновидности: торцовый и вибрационный выпуски руды. Необходимость отбойки больших массивов горных пород в подземных условиях дала толчок к созданию научных основ и технологий, обеспечивающих достаточно равномерное и мелкое дробление массива пород при взрывных работах.

Существенным достижением явилось создание слоевых одностадийных систем разработки мощных рудных залежей с закладкой выработанного про-

странства, особенно для условий повышенного напряженного состояния горного массива. Большое значение имеет также разработка технологических схем выемки пологих и наклонных залежей с применением самоходного оборудования, а также коренное совершенствование технологии эксплуатации маломощных и жильных рудных месторождений на базе механизированных комплексов.

Вскрытие рудных месторождений является первым и весьма важным этапом их промышленного освоения. Для обеспечения растущих объемов добычи используются новые высокопроизводительные технические средства и высокоэффективные технологии подземной разработки руд. Все это требует обоснования новых решений для вскрытия месторождения, в частности, создания эффективных схем вскрытия, технологических схем и средств транспортирования руды из подземных выработок на обогатительную фабрику. Таким образом, разработка научных основ и методов определения эффективных, экономически оптимальных и технологически обоснованных величин шага вскрытия при подземной эксплуатации месторождений представляет собой крупную научную проблему.

**Основными направлениями исследований являются:** изучение влияния природных и горнотехнических факторов на элементы схем и основные конструктивные параметры вскрытия;

установление основных направлений развития схем и конструктивных параметров вскрытия;

разработка методологических принципов определения экономически эффективных и технологически совершенных схем и рациональной величины шага вскрытия запасов в шахтном поле;

исследование условий и эффективности комплексного вскрытия запасов в шахтном поле; определение методологических принципов ступенчатого вскрытия месторождений, залегающих на больших глубинах.

Для подземных горных предприятий, существующих более 30–40 лет, характерно вскрытие верхних запасов многочисленными неглубокими стволами, которые в дальнейшем могут прекратить свое существование. В последние годы месторождения, залегающие на небольшой глубине, часто вскрывают уклонами, по которым транспортируют руду самоходным оборудованием.

Вскрытие месторождений, залегающих на средних и больших глубинах, повсеместно осуществляется вертикальными шахтными стволами. Применяемое ранее в ряде случаев вскрытие наклонными стволами с целью сокращения объема проходки квершлагов в настоящее время не используется. Практика показала, что скиповой подъем по наклонным стволам менее надежен в эксплуатации, чем по вертикальным.

В связи с массовым применением на подземных работах самоходных колесных машин на рудниках проходят с поверхности уклоны и съезды большого сечения, обеспечивающие возможность перемещения по ним самоходных машин с поверхности до забоя. Это позволяет осуществлять профилактику и ре-

монтаж машин в хорошо оборудованных мастерских на поверхности. Однако по экономическим соображениям расстояния перемещения машин собственным ходом, как правило, не могут превышать 5–7 км. Поэтому при глубине разработки месторождений более 1 км спуск самоходного оборудования в подземные выработки осуществляют через специальные вертикальные стволы.

При подземной разработке крутопадающих и наклоннопадающих месторождений в шаг вскрытия могут входить запасы одного или нескольких этажей. В первом случае – это традиционное поэтапное вскрытие запасов, во втором – многоэтажное вскрытие. Современными исследованиями установлено, что главными преимуществами многоэтажного вскрытия и подготовки запасов полезного ископаемого концентрационными горизонтами являются сокращение сроков и стоимости вскрытия и подготовки запасов к очистной выемке, обеспечение бесперебойной работы горного предприятия и стабильности качества руды, возможность уточнения геологических данных, запасов и качества полезного ископаемого, повышение эффективности использования выработок основных и промежуточных горизонтов, эксплуатируемых в них механизмов, оборудования транспортных и подъемных средств.

При разработке месторождений, залегающих на больших глубинах, основным является способ вскрытия вертикальными шахтными стволами с максимально возможной глубиной первой ступени подъема. При этом нижние горизонты вскрывают слепыми вертикальными или наклонными стволами также значительной длины исходя из стремления уменьшить общее число ступеней подъема и тем самым сократить капитальные и эксплуатационные затраты на оборудование стволов. Вентиляционные стволы, имеющие меньший диаметр, целесообразно проходить сразу до конечной глубины разработки месторождения.

На протяжении всего периода деятельности человека, связанной с добычей полезных ископаемых подземным способом, вплоть до 60-х годов XX века управление НДС – напряженно-деформированным состоянием (горным давлением) массива горных пород осуществлялось на уровне горного искусства. Практический опыт, интуиция и первые приближенные методы геомеханических расчетов в конечном итоге приводили к тому, что управление горным давлением заключалось в приспособлении к нему технологии добычи руды: изменяли порядок ведения очистных работ, расположение и ориентировку выработок, уменьшали размеры камер, увеличивали целики, в которых оставляли до 50–60 % запасов блоков, заменяли прогрессивные в данных горно-геологических условиях системы разработки на менее прогрессивные, но более устойчивые по отношению к горному давлению, что отрицательно сказывалось на полноте извлечения руды и экономических показателях добычи. С увеличением глубины горных работ и ростом горного давления эти экстенсивные технологические приемы стали ощутимым тормозом в развитии подземной добычи руд.

Начиная с 60-х годов стали проводить исследования по управлению НДС массива не путем усиления подземных конструкций, а путем изменения их жесткости (податливости), что следует считать началом разработки интенсивных методов управления НДС массива. Помимо этого, создавали системы разработки с податливыми целиками при практически сплошном разбурировании их оснований, с разгрузкой выработок днища от высоких напряжений путем образования специальных траншей или разгрузочных щелей. Однако эти технологические приемы были недостаточно геомеханически обоснованы, оказались малоэффективными и чрезвычайно трудоемкими, поэтому не нашли применения на практике.

К 80-м годам были обоснованы и внедрены практику технологические приемы управления НДС массива в строго заданных в широком диапазоне изменения пределах. Эти приемы стали составной частью систем разработки месторождений. В качестве податливого элемента использовали закладочный материал. Впоследствии были разработаны и сейчас широко применяются специальные технологические схемы ведения горных работ.

Перспективным явилось технологическое решение по наработке или подработке сближенных рудных тел или пластов, когда выемка одного из них обеспечивает разгрузку от напряжений других. Это решение стало одним из основных в борьбе с горными ударами.

Обоснование на базе решения объемных геомеханических задач указанных направлений по интенсивному управлению НДС массива и разработка применительно к ним технологических схем ведения горных работ является главным научным достижением в данной области за последнее время. Для управления НДС перспективны направления исследований, позволяющие целенаправленно перемещать максимумы горного давления из рудного или породного массива в зону ведения очистных работ в глубину горного массива или на малоответственные участки путем создания со строго рассчитанными параметрами плоскостей и зон ослабления в конструктивных элементах или массиве пород, в том числе путем закладки выработанного пространства, наработки, подработки и т.п.

Буровзрывные работы (БВР) в рудниках – это комплекс технологических процессов, направленных на отделение и дробление горного массива при помощи взрыва.

На настоящий момент в подземной технологии можно выделить два основных класса буровзрывных работ: отбойку массива с помощью шпуров диаметром 40–60 мм и глубиной до 4 м; массовое обрушение массива с помощью глубоких скважин.

В исследованиях технологии скважинной отбойки можно отметить следующие направления: обоснование и выбор диаметра скважинного заряда; пучковое расположение скважинного заряда; пучковое расположение скважинного заряда и теория расчета параметров пучков; теоретическое обоснование учета напряженности массива взрывааемых пород на параметры БВР.

Были разработаны новые типы ВВ, отличающиеся высокой безопасностью в обращении и позволяющие механизировать технологию заряжания. Обоснованы теоретические положения по механизации взрывных работ и разработке зарядного оборудования.

Значительная составляющая БВР в себестоимости извлечения полезного ископаемого из недр требует интенсификации работ в направлении поиска более простых и дешевых ВВ. Как правило, в этих направлениях просматривается увеличение критического диаметра заряда, что требует коренной перестройки в области бурения взрывных скважин, методов и оборудования для их зарядки.

**Основными направлениями совершенствования буровзрывного способа отделения и дробления массива на подземных работах являются:**

- разработка новых теоретических моделей дробления горных пород взрывом; оптимизация объемов буровзрывных работ в соответствии с технологическими требованиями и экологическими условиями;

- разработка дешевых, безопасных в обращении ВВ, позволяющих механизировать процессы погрузочно-разгрузочных и зарядных работ;

- разработка технологических решений буровзрывного способа дробления массива, обеспечивающих заданные показатели качества взрыва, управление кусковатостью отбитой горной массы;

- новые технологические решения, обеспечивающие снижение расхода ВВ при повышении общего качества взрыва.

Под выпуском в физико-технической подземной геотехнологии понимается организация извлечения разрыхленной горной массы из эксплуатационного блока через отверстия ограниченных размеров за счет его истечения под действием силы тяжести.

Разнообразие горнотехнических условий, а главное, положенные в основу общепринятых методик расчета эмпирические параметры не позволяют считать научные исследования по выпуску руд завершенными. В целом, основываясь на общих задачах физико-технической подземной геотехнологии и известных результатах исследований по выпуску руд, можно считать приоритетными направлениями исследований на ближайшую перспективу:

- создание теории выпуска неравномерно-раздробленных и неравномерно-уплотненных сыпучих горных материалов с учетом напряженно-деформированного состояния среды и изменения ее состояния в процессе движения материала;

- изучение динамической системы «массовая отбойка – выпуск полезного ископаемого» с точки зрения взаимовлияния ее составляющих;

- изучение динамики потока неравномерно раздробленного материала в сходящихся каналах;

- исследование влияния на механизм и динамику истечения сыпучих горных материалов внешних механических и немеханических воздействий и разработка на этой основе нетрадиционных технологий выпуска руд.

Процессы погрузки и доставки включают в себя перемещение раздробленного полезного ископаемого от забоя (точки выпуска) до погрузочного пункта магистрального транспорта, включая погрузку материала. Данные процессы теснейшим образом связаны с соответствующими разделами геотехники. Технология доставки определяется принятым типом горного оборудования, которое, в свою очередь, должно удовлетворять требованиям технологии разработки, т.е. эффективность работы оборудования зависит от его соответствия параметрам системы разработки, а ее результативность – от эффективности и надежности работы горных машин.

**Приоритетными направлениями исследований в области погрузки и доставки являются:**

- научное обоснование выбора наиболее эффективного горного оборудования для погрузки и доставки при минимальной энергоемкости и высокой экологичности процесса;
- разработка новых средств осуществления процесса доставки – погрузки полезных ископаемых на шахтах.

Понятие подземного магистрального транспорта включает в себя как объединенный грузопоток полезного ископаемого, так и транспортную систему для его перемещения от сборочного (погрузочного) пункта до ствола шахты.

Становление горной науки о подземном транспорте полезных ископаемых неразрывно связано с геотехникой, а с технологической точки зрения – со схемами вскрытия и подготовки месторождений, организацией грузопотоков, сопряжено со смежными технологическими процессами, разработкой требований к соответствующему горному оборудованию.

Приоритетными научными направлениями исследований подземного транспорта являются:

- создание нетрадиционных видов транспорта (например, пневмотранспорта);
- разработка научных основ выбора наименее энерго- и трудоемкого вида транспорта.

Технология перемещения полезных ископаемых в шахте теснейшим образом связана с геотехникой и всей технологией подземной добычи. Например, схемы доставки и транспорта определяют схемы вскрытия и подготовки месторождения. С другой стороны, экономичность той или иной схемы перемещения не в последнюю очередь определяются необходимым объемом горных работ.

Вследствие этого развитие данного раздела физико-технической геотехнологии невозможно без тесной взаимоувязки с другими горными науками, прежде всего геотехникой, геоинформатикой, проектированием и строительством горных предприятий.

Основные направления фундаментальных исследований в области физико-технической подземной геотехнологии применительно к освоению месторожде-

ний руд черных, цветных металлов и горно-химического сырья связаны со следующими проблемами:

- создание подземных рудников многофункционального назначения, обеспечивающих рациональное использование и своевременное воспроизводство георесурсов недр различного назначения;

- разработка ресурсосберегающих технологий реконструкции подземных рудников, направленных на сохранение и развитие их производственного потенциала в новых макроэкономических и экологических условиях;

- научное обоснование стратегии сбалансированного функционирования и развития горнорудной и машиностроительных отраслей горно-обогатительного и горно-металлургического комплексов.

Для решения этих крупных и комплексных по своему содержанию проблем необходимо дальнейшее развитие всех смежных горных наук и в первую очередь:

- горнопромышленной геологии, геометрии и квалиметрии недр, которые должны обеспечить геотехнологию существенно большим объемом информации о месторождениях полезных ископаемых, расширить ее номенклатуру и оперативность, повысить точность данных о состоянии запасов, их контурах и качестве, закономерностях изменения показателей качества и условий залегания;

- геомеханических методов оценки состояния массива горных пород для его анализа и прогноза при различных технологиях горных работ на больших глубинах и при комбинированной разработке;

- теории разрушения горных пород в свете нейтрализации негативных проявлений взрывного способа, повышения эффективности механического, термического и гидравлического разрушения, создания принципиально новых способов разрушения горных пород, альтернативных существующим;

- рудничной аэрогазодинамики с целью изучения аэрологических условий на больших глубинах и создания эффективных и экономичных средств и схем вентиляции горных выработок;

- теории проектирования освоения недр, которая должна дать надежные научные методы обоснования параметров, конструкций горных выработок, анализа динамики горных работ, создать научную базу инженерных систем автоматизированного проектирования рудников и шахт;

- горной экологии в свете изучения реальных экологических последствий в окружающей среде во взаимосвязи со способами и технологиями горных работ.

Основным процессом, определяющим эффективность подземного способа разработки угольных месторождений, является очистная выемка. Поэтому усилия ученых были направлены в первую очередь на разработку научных основ, обеспечивающих технический прогресс в этом вопросе. Наибольшее внимание уделялось созданию технологии и средств механизации применительно к полуголым угольным пластам, преобладающим в ресурсной базе твердых топлив России и наиболее интенсивно разрабатываемым.

Технология очистных работ в своем развитии прошла следующие этапы.

I. Механизация отдельных производственных процессов. Этот этап во многих странах, за исключением США, Австралии, ЮАР, характеризуется применением длинных очистных забоев с механизацией процессов зарубки и доставки угля. Такая технология применялась вплоть до 50-х годов.

II. Совмещение во времени отдельных механизированных производственных процессов (отбойка, навалка, доставка угля, крепление и управление кровлей) и начало применения узкозахватной выемки. Эта технология применялась в период с 50-х до начала 70-х годов.

III. Комплексная механизация основных производственных процессов с их частичной автоматизацией на базе узкозахватной технологии. В настоящее время эта технология занимает господствующее положение в нашей стране, в странах Европы и достаточно широко применяется в США и Австралии.

Отечественными учеными впервые в мировой практике была поставлена и успешно решена крупнейшая научно-техническая и социальная проблема комплексной механизации очистных работ в длинных очистных забоях на пологих угольных пластах. Были обоснованы принципы этой прогрессивной технологии:

создание бесстоечного пространства между забоем и лавным конвейером;

применение узкозахватных выемочных машин;

совмещение основных операций выемочного цикла – отбойки, погрузки, транспортировки (доставки) угля, крепления и управления кровлей во времени и пространстве, что обеспечивает поточность процесса выемки.

Одновременно с разработкой научных основ узкозахватной комплексно-механизированной технологии очистных работ шла ее практическая реализация. Основными машинами, обеспечивающими комплексно-механизированную технологию очистных работ, являются механизированные гидравлические передвижные крепи, узкозахватные комбайны или струги, скребковые конвейеры. При этом определяющую роль в создании современных технологий сыграла механизированная крепь.

Первая в мире щитовая механизированная крепь была предложена И.А. Журавлевым и испытана в 1935 году на шахте Сюлюкта. В конце 40-х годов в Гипроуглемаше создали узкозахватный комбайн ВОР. Приоритет в создании струговых установок принадлежит специалистам Германии, особенно фирме «Вестфалия Люнен».

Каждому составу пород кровли должна соответствовать механизированная крепь с определенными параметрами. Основным параметром механизированных крепей является рабочее сопротивление. Соответственно для легко-, средне- и трудноуправляемых кровель применяют механизированную крепь с умеренным, повышенным и высоким рабочим сопротивлением.

Выбор рациональных параметров механизированных крепей в каждом классе кровли по управляемости массивом осуществляется по трем критериям: предельно допустимая конвергенция кровли в призабойном пространстве; пре-

дотворачивание разрыва кровли в пределах призабойного пространства в периоды глобального сдвижения массива; минимизация завесаний кровли за пределами призабойного пространства.

Сущность комплексно-механизированной технологии состоит в следующем. Вслед за очистным выемочным комбайном, осуществляющим отбойку и погрузку угля на конвейер, с минимальным отставанием от него передвигаются секции механизированной крепи. При челноковой схеме работы передвижка лавного конвейера осуществляется «волной», а при односторонней выемке передвижка конвейера осуществляется после перегона комбайна в исходное положение для зарубки.

При струговой технологии, когда выемка угля осуществляется исключительно по челноковой схеме, исполнительный орган – струг, перемещаемый вдоль лавы тяговой цепью, находится в постоянно прижатом к забою положении и производит отбойку и погрузку угля. Выдвижка секций крепи или их козырьков осуществляется группами в определенной последовательности.

В практике шахт России господствующее положение занимает комбайновый вариант технологии, легче приспособляемый к изменениям горно-геологических условий залегания пласта. Струговая выемка, требующая для своего эффективного использования относительно низкой сопротивляемости угля резанию и прочной почвы пласта, имеет более ограниченную область применения на шахтах России.

Наибольшее распространение струговая технология получила на шахтах Германии. В незначительных объемах она применяется в Украине, Польше, Чехии. Этому варианту технологии отдают предпочтение при отработке тонких пластов мощностью до 1,4 м со спокойной гипсометрией и наличием других благоприятных горно-геологических факторов.

На современном этапе развития отечественной угольной промышленности совершенствование технологии с применением комбайновых очистных комплексов связано с повышением надежности и энерговооруженности оборудования.

Высокий уровень механизации производственных процессов при комплексно-механизированной технологии выемки угольных пластов и научные достижения в области систем и технических средств управления производственными процессами сделали возможным переход к следующему этапу технического развития технологии очистных работ с автоматизацией основных производственных процессов и компьютеризацией принятия решений. Прогресс в этой области произошел в начале 80-х годов, когда была разработана электрогидравлическая система управления щитовой механизированной крепью. Благодаря использованию искробезопасной микроэлектроники и слаботочных электромагнитных клапанов появилась возможность установить на каждой секции крепи малогабаритные гибкие устройства управления. Эта система управления позволила:

– улучшить управление кровлей за счет более быстрой автоматической оценки процесса взаимодействия крепи и вмещающих угольный пласт пород, а также за счет быстрой выработки управляющих взаимодействий;

– обеспечить дистанционную техническую диагностику состояния системы и оборудования и возможность установления логической связи с рабочими операциями выемочной машины и крепи, создав тем самым условия для вывода человека из опасных зон;

– улучшить адаптацию комплекса к изменяющимся условиям разработки.

Управление процессом выемки пласта осуществляется специальной системой, в которую входят подсистемы управления комбайном, крепью и конвейером. При этом в автоматическом режиме осуществляются вождение комбайна по гипсометрии и мощности угольного пласта, его зарубка. Для технологии струговой выемки такая система охватывает следующие функции: выемка с фиксированной глубиной резания; отодвигание конвейера при блокировке струга; автоматическая передвижка конвейера; синхронная выдвигка верхних секций крепи; выдвигка крепи в одиночном или групповом режиме; синхронизация выемки и орошения. Вся информация отображается на штрековом дисплее. Технология находится на стадии становления и применяется в благоприятных горно-геологических условиях.

Созданная с использованием достижений науки в области геомеханики, теории резания, управления, геотехники и машиноведения технология очистных работ с комплексами, оснащенными микропроцессорными системами управления, позволила резко интенсифицировать производственные процессы, повысить производительность труда рабочих и их безопасность. Эта технология еще не обеспечила полный вывод людей из опасной зоны очистного забоя, однако создала возможность существенного сокращения состава сменного звена очистного забоя. В высокопроизводительных лавах Австралии, США и Великобритании состав сменной бригады по обслуживанию оборудования лавы составляет в среднем шесть человек.

Многолетние поиски принципиально новых технологий очистных работ, выполняемых без присутствия человека в призабойном пространстве, до сих пор не увенчались успехом, и нет оснований делать на них ставку в ближайшем будущем. Так, фронтально-агрегатная технология выемки угля без постоянного присутствия человека в призабойном пространстве, испытываемая в вариантах кольцевых исполнительных органов и исполнительных органов, устанавливаемых на каждой секции крепи, не нашла применения вследствие сложности конструкций агрегатов и жестких требований к горно-геологическим условиям.

Проблема радикального сокращения ручного труда не имела решения до тех пор, пока не появились первые образцы шахтной робототехники. Наибольший интерес представляет ее основной компонент – манипулятор. Это много-степенной, оснащенный следящими приводами, дистанционно управляемый исполнительный механизм, обладающий необычайно широким спектром функ-

циональных и технологических возможностей. С помощью одного многоцелевого манипулятора можно выполнить множество разнородных вспомогательных операций, что в перспективе делает его полноценным средством замены ручного труда.

Не менее трудной является проблема вывода людей из вредных для здоровья и опасных для жизни технологических зон. Эта проблема имеет два аспекта – механический и информационный. Люди присутствуют в лаве, во-первых, для того, чтобы выполнять двигательные действия и, во-вторых, для контроля и управления рабочими процессами. Введение в состав очистного комплекса дистанционно управляемых манипуляторов позволит уже при существующей степени надежности, адаптивности и автономности машин исключить необходимость постоянного присутствия людей в лаве в связи с выполнением штатных вспомогательных операций, нештатных ремонтно-восстановительных работ, а также простейших операций по устранению внешних неисправностей оборудования.

Информационную сторону проблемы во всей ее глубине удалось раскрыть, выполнив микроструктурный анализ трудовой деятельности машинистов забойного оборудования. Поскольку человек около 90 % информации получает из внешнего мира по зрительному каналу, на первое место по значимости следует поставить визуальное сенсорное устройство – телевизионную установку. Она может рассматриваться как универсальный датчик интегральной информации. В то же время телевизионная установка входит в состав дистанционно управляемых манипуляционных роботов, где используется в качестве эффективного средства внешней обратной связи оператора с объектом.

Таким образом, шахтная робототехника в совокупности с новейшими средствами дистанционного контроля и управления дает принципиальную возможность радикально решить обе узловые проблемы технического развития и создать выемочное оборудование качественно нового уровня – роботизированные выемочные комплексы.

Техническая база для решения данной задачи уже имеется. Это – теоретические разработки, опытные образцы и накопленный в отрасли опыт применения простейших манипуляционных устройств, мировые достижения в области шахтной робототехники и в родственных сферах (строительные, подводные, аварийно-восстановительные и другие работы в экспериментальных нестационарных средах), значительный научно-технический задел, сконцентрированный в многочисленных изобретениях, технологических и конструкторских проектах. Робототехника будет стимулировать поиск новых технологических решений, в рамках которых ее потенциальные возможности раскроются более полно и с высоким экономическим эффектом. Основной «выигрыш» от робототехники на первом этапе ее применения определяется не технико-экономическими, а социально-экологическими критериями повышения безопасности, оздоровления и облегчения труда, которые являются одними из доминирующих в оценке любой горной техники.

Сложнее решается проблема создания эффективной технологии для отработки крутых угольных пластов. Попытки переноса основных технико-технологических решений, использовавшихся на пологих пластах, на крутые пласты тонкие и средней мощности за редким исключением положительного эффекта не дали. Существенную отрицательную роль играет также склонность этих пластов к внезапным выбросам угля и газа. Высока трудоемкость и велика опасность работ с использованием агрегатов особенно при монтаже–демонтаже и изменении длины очистного забоя. В большинстве стран мира от отработки таких пластов отказались, а продолжающаяся их отработка в Центральном районе Донбасса обусловлена высоким качеством коксующихся углей.

Многочисленные исследования и эксперименты по созданию эффективной технологии разработки мощных крутых пластов Кузбасса позволили прийти к выводу, что в сложных горно-геологических условиях района (большая мощность пластов, их высокая газоносность, пожароопасность, сближенность, нарушенность и др.) наиболее эффективной является заимствованная из практики разработки мощных рудных тел технология выемки горизонтальными слоями с литой твердеющей закладкой. В процессе исследований проявления горного давления, сдвижения пород висячего и лежачего боков были установлены рациональные параметры технологии и обоснованы несколько технологических схем, отличающихся в основном набором используемого оборудования. Считается целесообразным наряду с технологией выемки комбайнами использовать гидравлическую и механо-гидравлическую технологии. Из-за невысоких технико-экономических показателей разработка мощных крутых пластов вряд ли получит широкое применение в перспективе.

Современная идеология освоения минерально-сырьевых и энергетических ресурсов угольных месторождений и создания горных предприятий должна предусматривать наряду с добычей угля при экономически оправданной полноте освоения запасов также рациональное, комплексное извлечение, использование сопутствующих углю полезных ископаемых, компонентов и вновь создаваемых ресурсов, в том числе выработанного пространства и низкопотенциального тепла недр.

Одним из главных и первоочередных направлений научных исследований физико-технической геотехнологии применительно к освоению угольных месторождений являются стабилизация и последующее развитие производства, улучшение его технико-экономических показателей. Исходя из того, что добыча угля подземным способом характеризуется высокой трудоемкостью и капиталоемкостью, в решении этой задачи основным направлением следует считать опережающее развитие открытого способа добычи как экономически наиболее эффективного. На долю подземного способа следует оставить добычу высококачественных коксующихся и энергетических углей, преимущественно в относительно благоприятных горно-геологических условиях.

В решении этой проблемы одной из центральных научных задач следует считать создание методологии обоснования рациональных ограничений по использованию запасов угля с учетом требований рентабельности производства и конечных цен потребителей. Не менее важным является создание методологии рационального районирования и размещения предприятий по добыче угля с учетом потребностей регионов и спроса на угли различных марок и транспортных тарифов.

Другая актуальная научная проблема заключается в интенсификации освоения угольных месторождений, т.е. в повышении полноты и комплексности использования всех ресурсов недр, сопутствующих углю. Для достижения этой цели необходимо создание теоретических основ и методов практической реализации комплексного освоения угольных месторождений.

#### 4.1.3. Комбинированная физико-техническая геотехнология

**Комбинированная физико-техническая геотехнология – раздел горных наук, обеспечивающий исследованиями технологии добычи твердого минерального сырья, сочетающие чаще элементы открытой и подземной геотехнологий или открытой физико-технической и физико-химической геотехнологий, увязанные в единый комплекс для повышения экономической эффективности добычи полезного ископаемого из минеральных скоплений глубокого и протяженного залегания.**

В части физико-технических геотехнологий горные науки о комбинированных геотехнологиях – это совокупность знаний о совмещении в пространстве и во времени открытого и подземного способов разработки месторождений, закономерностях поведения системы «карьер–подземные выработки» в массиве горных пород, технических, экономических, экологических и организационных взаимосвязях технологических процессов при добыче полезных ископаемых.

Развитие этого раздела горных наук связано с тем, что производство горных работ на больших глубинах сопровождается резким увеличением объемов вскрытия и существенным усложнением схем вскрытия, ухудшением геомеханической обстановки и усложнением проветривания карьеров. Это потребовало глубокого научного, технологического и экологического обоснования границ между открытыми и подземными работами, поиска их рационального совмещения и порядка ведения, обеспечивающих наиболее эффективную отработку месторождения в целом.

Одним из условий эффективного комбинированного освоения месторождения является рациональное использование выработанных пространств для технологических нужд и в интересах улучшения экологической обстановки.

**Объектами изучения комбинированной физико-технической геотехнологии** являются открытые и подземные горные сооружения, создаваемые для добычи полезных ископаемых, предметом изучения – системы комбинированной разработки месторождений полезных ископаемых, геомеханическая ситуа-

ция при совмещении открытого и подземного способов разработки месторождения, экологические последствия горных работ и меры по охране недр и окружающей среды.

**Главная задача** этого раздела горных наук состоит в выработке научных рекомендаций, обеспечивающих надежность, безопасность и эффективность реализации технических и технологических решений по извлечению полезных ископаемых из недр на основе установленных объективных закономерностей и взаимосвязей между параметрами системы «карьер–подземные выработки», последовательностью формирования сооружения, технологическими процессами горных работ, экологической безопасностью и экономической эффективностью извлечения полезных ископаемых из недр.

В мировой и отечественной практике исследования, связанные с комбинированными геотехнологиями, начались в 1950-х годах, что совпало с началом их применения на практике, когда стали осуществлять перевод действующих подземных рудников на открытый способ разработки. Причиной тому послужило техническое перевооружение открытых работ, что способствовало резкому снижению себестоимости добычи полезного ископаемого данным способом. В связи со сложными условиями ведения открытых работ в зоне, нарушенной подземными работами, большое внимание уделялось вопросам безопасности и определению параметров открытых работ, как по технологическим, так и по геомеханическим факторам. В результате исследований была создана достаточно стройная методика расчета безопасных параметров открытых работ в зоне влияния подземных разработок, прошедшая успешную проверку в условиях Норильского, Хайдарканского, Лениногорского, Зырянского и других комбинатов.

В этот же период проводится ряд исследований по изысканию рациональных вариантов вскрытия и отработки рудных месторождений.

Период 70-х годов прошлого века характеризуется интенсивными изысканиями в области повышения эффективности открытых и подземных работ при их совместном ведении за счет оптимального решения вопросов вскрытия, разработки и взаимопроникновения технических процессов, что обеспечивает возможность использования преимуществ каждого отдельного способа. Следует отметить достижения в области геомеханических исследований, результаты которых позволяют обосновывать параметры технологий с высокой степенью их надежности.

В результате выполненных исследований был разработан комплексный открыто-подземный способ добычи, заключающийся в разработке месторождения по глубине тремя ярусами: первый отрабатывается открытыми работами до их проектной глубины; второй (открыто-подземный ярус) – одним высоким уступом без разноса бортов карьера с использованием карьерной (и подземной) буровой техники и выдачей руды через подземные выработки; третий – подземными работами этажно-камерной системой или системами с обрушением. Обра-

зующееся при этом единое выработанное пространство карьера, открыто-подземного яруса и подземных горных работ используется для размещения вскрышных пород, которые, создавая пригрузку бортов выработанного пространства, повышают их устойчивость. При трехъярусном открыто-подземном способе наряду с повышением технико-экономических показателей добычи полезных ископаемых и повышением полноты их извлечения из недр достигается значительный экологический эффект за счет существенного сокращения масштабов изъятия земель под внешние отвалы.

Характерной особенностью открыто-подземного способа является наличие карьерного и подземного очистных пространств, находящихся в непосредственной близости. Совмещение открытых и подземных работ выдвигает на первый план геомеханические аспекты выбора технологических схем и параметров разработки. Это обусловлено необходимостью совместных оценок состояния и проведения как подземных выработок концентрационного и добычного горизонтов, так и конструктивных элементов соответствующих бортов карьера. Наличие карьерной выемки может в значительной степени усложнить геомеханическую обстановку в зоне подземных работ, увеличивая концентрацию напряжений в элементах системы подземной разработки. С другой стороны, создание обширных выработанных пространств под землей, особенно при использовании систем с обрушением, ведет к разрушению и разупрочнению налегающего массива горных пород, ухудшая состояние бортов карьера и разделительного целика.

Прогнозирование поведения подрабатываемых массивов горных пород, оценка устойчивости обнажений, определение допустимых технологических параметров разработки в этом случае могут базироваться только на глубоком изучении геомеханических процессов, протекающих в зоне взаимного влияния подземных и открытых работ.

К первоочередным задачам следует отнести оценку устойчивости уступа, открыто-подземного яруса, бортов карьера, состояния подземных выработок с учетом выбранной системы разработки, а также состояния целика, разделяющего открытые и подземные работы.

На характер и интенсивность механических процессов, протекающих в массиве пород в условиях открыто-подземной разработки, влияет большое число естественных и техногенных факторов. К первым можно отнести исходное напряженное состояние, строение и структуру массива, а также гидрогеологические факторы, ко вторым – проведение достаточно мощных взрывов и работу погрузочно-доставочного оборудования. Естественно, важную роль играют геометрические параметры подземных и открытых выработок, их взаимное расположение, порядок отработки. Перечисленные факторы составляют тот обязательный набор, который должен быть учтен при анализе состояния и поведения элементов открыто-подземного способа разработки.

Общая устойчивость борта определяется: литологическим состоянием пород, их прочностью, характером и степенью трещиноватости; направлением па-

дения слоев или плоскостей рассланцованности; тектоническими нарушениями, простирание которых близко к простиранию борта; материалом, заполняющим тектонические разломы и нарушения; гидростатическим давлением, распределенным по поверхности скольжения.

Устойчивость отдельных уступов, в частности уступа открыто-подземного яруса, зависит от тектонической нарушенности данного участка; интенсивности трещиноватости пород, склонности пород к выветриванию; ориентировки относительно простирания откоса крупных тектонических трещин, фильтрационных деформаций, связанных с просачиванием воды на откосы уступов.

Все перечисленные факторы в подавляющем большинстве случаев оказывают в той или иной степени отрицательное влияние на устойчивость обнажений открытой горной выработки.

Предпосылкой успешного решения задач обеспечения эффективности и безопасности горных работ является знание закономерностей распределения напряжений, деформаций и смещений, формирующихся в массиве в процессе эксплуатации месторождения с использованием сложной геомеханической системы «карьер – подземный рудник».

Очевидно, что степень необходимой детализации параметров напряженно-состояния массива напрямую связана с возникающими горнотехническими задачами и может варьироваться в широких пределах. Это предопределяет использование того или иного метода из большого арсенала разработанных к настоящему моменту. Инженерные методы, отражающие, как правило, какую-либо одну характерную черту процесса деформирования, возможно главную, позволяют легко и быстро получить приближенные оценки состояния массива, в то время как методы механики сплошной среды позволяют изучить тонкости деформирования и разрушения, происходящие в массиве, с учетом его строения и развития в нем этих процессов. По-видимому, самым мощным исследовательским аппаратом такого плана в настоящее время является метод конечных элементов. При этом не следует сбрасывать со счетов и другие численные методы, а также аналитические решения. Следует, однако, иметь в виду, что характерной особенностью рассматриваемой проблемы является взаимное влияние карьера и подземных выработок. Это означает, что исходные напряжения в массиве невелики в сравнении с прочностными показателями породы, но сопоставимы с аналогичными величинами по поверхностям нарушений в массиве горных пород. Следовательно, значительную роль в поведении массива горных пород должны играть слоистость, сланцеватость, трещиноватость и иные нарушения однородности и изотропии прочностных свойств. Это предопределяет использование различных нелинейных моделей поведения массива, в частности, пластической, трещинно-блочной и др. Линейно-упругая модель также может быть полезной для оценки начальных зон пластичности и разрушения.

Важным моментом при исследовании рассматриваемой проблемы и определении параметров технологии является то, что в оценке устойчивости подзем-

ных обнажений, бортов и уступов открытых выработок определяющую роль играет распределение напряжений в массиве с выделением объемных зон разрушения в окрестности выработки и наличие призм скольжения с локализацией разрушения на некоторой заранее неизвестной поверхности. При этом не менее важны развитость трещиноватости массива, обводненность пород и их реологические свойства. Исследования в этих направлениях явились методической базой обоснования параметров открытого и открыто-подземного ярусов, что обеспечивает рациональные объемы вскрышных работ в сочетании с гарантированной устойчивостью бортов карьера и уступов открыто-подземного яруса.

Проведенные исследования и проектные проработки позволили установить, что преимущественной областью применения комплексного открыто-подземного способа являются протяженные крутопадающие месторождения с однородным характером оруднения. Основными факторами, определяющими конкретную технологическую схему, являются мощность залежи и устойчивость массива. В регионах с ценными сельскохозяйственными угодьями эффективность открыто-подземного способа обеспечивается за счет сокращения площадей, занимаемых внешними отвалами. В регионах с невысокой ценностью земель основным фактором, определяющим эффективность новой технологии, является снижение затрат на буровзрывные работы, отвалообразование и транспорт горной массы, а также повышение интенсивности эксплуатации месторождения за счет специально обоснованного сочетания элементов открытого и подземного способов добычи.

Оценку возможной интенсивности добычи руды из открыто-подземного яруса целесообразно осуществлять путем определения возможной скорости подвигания эксплуатационного фронта работ по условиям буровзрывных работ, выпуска руды и внутреннего отвалообразования.

Факторы, влияющие на возможную интенсивность добычи руд из открыто-подземного яруса, могут быть условно разделены на две группы: первая – факторы, определяющие площадь сечения выработанного пространства, вторая – факторы, обуславливающие скорость подвигания фронта работ. Вместе с тем две указанные составляющие являются взаимозависимыми, поскольку размер добычного фронта обычно связан обратно пропорциональной зависимостью со скоростью его подвигания.

Среди горно-геологических факторов следует выделить мощность рудного тела и физико-механические характеристики руд и вмещающих пород, среди технологических факторов наиболее важны: применяемая технологическая схема; высота открыто-подземного яруса; используемые комплексы оборудования.

Мощность залежи является одним из основных факторов, определяющих ширину фронта горных работ и площадь сечения выработанного пространства. С увеличением мощности залежи происходит расширение фронта, что позволяет увеличить число единиц одновременно действующего оборудования. Вместе с тем из-за уменьшения коэффициента использования средств механизации

в течение смены скорость подвигания фронта с ростом мощности залежи, как правило, уменьшается. Кроме того, мощность залежи является важным фактором при выборе технического варианта комплексного открыто-подземного способа.

Угол падения залежи влияет на выбор варианта комплексного открыто-подземного способа разработки. При углах падения, близких к  $90^\circ$ , могут быть применены варианты, предусматривающие свободный выпуск руды и придание бортам выработанного пространства безопасных углов откоса. При углах падения порядка  $79^\circ$  и мощности залежи менее 100 м наиболее целесообразен вариант, предусматривающий полное заполнение выработанного пространства.

Физико-механические характеристики массива определяют главным образом безопасные углы откоса бортов выработанного пространства и характер их изменения с высотой яруса, обуславливая тем самым площадь сечения выработанного пространства и ширину фронта работ. Кроме того, физико-механические характеристики оказывают влияние на сменную производительность бурового и погрузочного оборудования через механическую скорость бурения и процент выхода негабарита. Таким образом, данный фактор определяет и скорость подвигания фронта работ.

Высота открыто-подземного яруса наряду с мощностью залежи определяет как площадь сечения выработанного пространства, так и скорость подвигания добычного фронта. С ростом высоты происходит увеличение запасов руды, приходящихся на один пункт выпуска. При вариантах, предусматривающих свободный выпуск руды, с ростом высоты яруса происходит уменьшение дна выработанного пространства, что ограничивает возможное число пунктов выпуска в транспортном орте. С другой стороны, высота открыто-подземного яруса тесно связана с глубиной взрывных скважин и, таким образом, оказывает влияние как на сменную производительность бурового оборудования, так и на процент выхода негабарита.

Технологический вариант комплексного открыто-подземного способа в значительной мере определяет высоту открыто-подземного яруса и способ выпуска рудной массы. При вариантах, предусматривающих обеспечение устойчивости бортов выработанного пространства за счет придания им безопасных углов откоса, используется площадный выпуск руды. При этом общая производительность выпуска возрастает при увеличении числа транспортных ортов, находящихся в одновременной эксплуатации в пределах навала отбитой руды. При вариантах, предусматривающих полное заполнение выработанного пространства горной массой, может быть реализован торцовый выпуск руды. Увеличение его производительности при заданной мощности залежи может осуществляться только путем увеличения числа погрузочно-разгрузочных штреков за счет сокращения расстояния между ними.

Применяемые комплексы оборудования оказывают влияние на скорость подвигания фронта горных работ, поскольку единичная мощность средств меха-

низации в значительной мере влияет на производительность соответствующих процессов.

Скорость подвигания рабочего борта карьера является ограничивающим фактором в технологических схемах, предусматривающих одновременное ведение работ в карьере и открыто-подземном ярусе.

По результатам исследований роли основных факторов, влияющих на эффективность и безопасность комбинированной геотехнологии, разработан ряд вариантов технологии отработки открыто-подземного яруса, а именно: с полным выпуском руды; с частичным магазинированием; с различным порядком формирования внутреннего отвала. Обоснованы параметры вариантов технологии.

В настоящее время доказано, что применение открыто-подземного способа в условиях мощных крутопадающих месторождений большой протяженности по сравнению с традиционной последовательной обработкой месторождения открытым, а затем подземным способом позволяет:

- снизить общие объемы вскрыши в контуре карьера благодаря отработке глубоких горизонтов одним высоким уступом без дополнительного разноса бортов;

- уменьшить ареал нарушения окружающей природной среды за счет сокращения объемов внешнего отвалообразования;

- повысить интенсивность отработки месторождения;

- в значительной мере компенсировать выбытие мощностей по добыче руды при отработке глубоких горизонтов карьера;

- использовать общие схемы вскрытия глубоких горизонтов карьеров и подземных рудников;

- обеспечить в целом более высокие технико-экономические показатели освоения месторождений и эффективное использование всех видов задалживаемых ресурсов.

Основными направлениями дальнейших исследований по совершенствованию и расширению области применения трехъярусного открыто-подземного способа разработки следует считать:

- совершенствование и изыскание новых технологических схем открыто-подземной разработки;

- оптимизацию параметров буровзрывных работ в открыто-подземном ярусе;

- обоснование эффективных схем совместного вскрытия глубоких горизонтов карьеров и шахтных полей;

- обоснование параметров нового высокопроизводительного технологического оборудования для открыто-подземной добычи полезных ископаемых;

- совершенствование технологических схем внутреннего отвалообразования при разработке крутопадающих месторождений открыто-подземным способом;

- разработку методов оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния массива при открыто-подземной добыче руд;
- разработку эффективных схем проветривания и водоотлива при наличии единого выработанного пространства.

Выполнение намеченного комплекса исследований явится необходимой теоретической базой для разработки научно-методических основ проектирования и эксплуатации месторождений открыто-подземным способом.

#### 4.1.4. Физико-техническая подводная геотехнология

Физико-техническая подводная геотехнология – это направление науки, обеспечивающее исследованиями различные технологии добычи твердых полезных ископаемых со дна водоемов и из морской воды.

В XXI столетии предстоит широкое освоение морской минерально-сырьевой базы – шельфовой зоны Российской Федерации с целью создания горных предприятий по добыче золота, янтаря, олова, меди и других ценных полезных ископаемых. Поэтому целесообразно уже сегодня приступить к решению научных задач, продиктованных необходимостью комплексных разработок специальной плавучей и подводной техники и технологии добычи полезных ископаемых со дна рек, озер, морей и океанов, а также добычи твердых полезных ископаемых из морской воды.

**Физико-техническая подводная геотехнология – это наука о способах и технологических процессах добычи полезных ископаемых из воды, а также при разработке месторождений, залегающих в обводненных породах и непосредственно под водой – по руслам и в поймах рек, на дне озер, на морском шельфе или в глубинной зоне акваторий морей, в том числе россыпных месторождений золота, платины, алмазов, олова, титана, редких металлов, песков, песчано-гравийных материалов, других месторождений полезных ископаемых, сложенных преимущественно рыхлыми осадочными породами.** Разработка таких месторождений обычными, «сухими» способами невозможна или затруднена по техническим, экономическим или экологическим причинам.

**Объектами исследований физико-технической подводной геотехнологии** являются обводненные или расположенные под водой георесурсы.

**Предметами исследований физико-технической подводной геотехнологии** являются подготовительные, основные и вспомогательные технологические процессы подводной разработки месторождений, их взаимосвязи между собой и с окружающей природной средой.

**Цель исследований** заключается в установлении закономерностей и взаимосвязей технологических процессов добычи полезных ископаемых из воды и под ее толщей, а главная задача – в научном обосновании эффективных, безопасных и экологически чистых технологий и способов добычи.

Преимуществами подводных способов добычи полезных ископаемых при их использовании в соответствующих условиях применения являются непрерывность, поточность производства, высокая производительность труда и относительно низкая себестоимость работ.

Физико-техническая подводная геотехнология как наука развивается в следующих направлениях: создание способов разрушения массива и извлечения полезных ископаемых под искусственно образуемыми водоемами; создание способов извлечения полезных ископаемых со дна морей и океанов под мощной толщей вод.

Промышленные технологии, относящиеся к первому направлению, начали применяться на практике во второй половине XIX в. и осуществляются до настоящего времени двумя типами оборудования – землесосными снарядами и драгами.

**Землесосный снаряд** – это плавучая землесосная установка, предназначенная для выемки полезных ископаемых и пород из-под воды и транспортирования пульпы на обогатительную фабрику, в отвал или на места возведения намывных насыпей (дамб, плотин, планировки территорий и т.д.). Землесосный снаряд имеет грунтозаборное устройство, всасывающее грунт непосредственно при работе землесоса или после его предварительного рыхления механическим или гидравлическим (напорной струей воды) способом.

Разработка рыхлых отложений землесосными снарядами в конце XIX и начале XX века использовалась в основном для дноуглубительных работ в портах, на реках, при строительстве каналов (во Франции – с 1859 года, в России – с 1874 года). С 1930-х годов по мере развития научных исследований и создания мощных и производительных земснарядов в СССР эта технология находит широкое применение в горной промышленности и строительстве. В 80-х годах ежегодный объем землесосных работ (не считая дноуглубительных) в стране достиг 1 млрд м<sup>3</sup>.

**Драга**, в отличие от землесосного снаряда, является не только плавучим выемочно-транспортным, но и обогатительным комплексом, оснащенным рабочим органом для добычи полезных ископаемых из-под воды, промывочно-обогатительными агрегатами для их первичного обогащения и транспортно-отвальным оборудованием для укладки отходов обогащения в отвал.

Впервые дражная разработка золотиносных россыпей была осуществлена в Новой Зеландии в 1863 году. В России первая драга была построена и введена в эксплуатацию в 1893 году на золотом прииске в Сибири. В 1906 году на Урале и в Сибири работали уже 32 драги, а перед Первой мировой войной – почти 70 драг, изготовленных преимущественно на уральских драгостроительных заводах. Дальнейшее развитие дражная разработка получила в СССР в 30-е годы и в послевоенный период. Ее удельный вес при разработке россыпей к 1975 году достиг 75 %, а затем несколько снизился (до 60 %). В эксплуатацию вошли крупные драги с черпаками вместимостью 600 л. В настоящее время дражные разработки россыпей ведут в различных климатических поясах России: на Ура-

ле, Алтае, в Восточной и Западной Сибири, в Забайкалье, Саха-Якутии и на Дальнем Востоке, включая северо-восточную его часть.

Большие объемы, обширная география и разнообразные горно-геологические условия применения землесосного и дражного способов разработки потребовали проведения глубоких научных исследований и конструкторских работ по изысканию эффективных технологий и технических средств добычи георесурсов из-под воды. В результате этих исследований была создана научная и инженерная база этого направления, технические средства разработки месторождений. Основные достижения проведенных исследований:

- выявление закономерностей выемки различных по свойствам грунтов и россыпей под водой и обоснование рациональных конструкций грунтозаборных (драгирующих) исполнительных органов гидравлического, механического и комбинированного действия;

- изучение закономерностей процесса подъема пород из воды и обоснование необходимых технических средств для землесосных снарядов и драг;

- разработка основных технологических схем подводной разработки месторождений, в том числе с применением шагающих экскаваторов и бульдозеров для ускоренного выполнения вскрышных работ;

- обоснование способов технических и организационных средств, обеспечивающих продление сезона работы землесосных снарядов и драг в районах с суровыми климатическими условиями;

- разработка научно-практических рекомендаций по нейтрализации или снижению неблагоприятных экологических последствий подводной разработки месторождений.

Большая часть этих научно-технических достижений более или менее удовлетворительно решает вопросы добычи полезных ископаемых, залегающих в относительно благоприятных горно-геологических, климатических и других условиях. Но таких месторождений становится все меньше, в разработку вовлекаются месторождения с большой глубиной залегания, расположенные в более суровых климатических условиях, в районах многолетней мерзлоты, с трудно-разрабатываемыми породами. Повышаются экологические требования. Для этих условий требуется решение указанных вопросов уже на более высоком научно-техническом уровне.

**Морская физико-техническая геотехнология** – горная наука о способах и взаимосвязях процессов извлечения полезных ископаемых со дна и недр Мирового океана.

Особенности морской геотехнологии определяются в первую очередь переносом работы горных машин и механизмов в водную среду, которая более чем в 800 раз плотнее обычной воздушной и обладает более высокой инерционностью (волновое воздействие и т.п.), что из-за сравнительно высокой способности к переносу морских масс существенно затрудняет проведение горных работ. Водная среда одновременно является средой обитания морской фауны и флоры,

что диктует особые требования к экологии производства. Трудности обусловлены также необходимостью создания плавучих устройств для пребывания человека над месторождением, складирования необходимых материальных ресурсов и размещения оборудования, энергоисточников и т.д.

Вместе с тем перенос горных работ в Мировой океан позволяет сократить изъятие земельных участков под горные предприятия и создаваемые для них инфраструктуры, как правило, в необжитых регионах, уменьшить негативное воздействие горных работ на природные ландшафты, земные и поверхностные водные массивы, т.е. на источники водоснабжения человеческого общества, воздушный бассейн. При добыче полезных ископаемых в морских условиях энергетические источники находятся на борту сооружения или судна, где располагается не только весь производственный комплекс, но и административные, жилищно-бытовые и социальные помещения. Такие устройства должны создаваться в условиях высокотехнологических судостроительных производств, размещаемых, как правило, в освоенных регионах, где трудо-, материало- и энергозатраты в несколько раз ниже, чем в тех регионах суши, где находятся альтернативные перспективные к освоению месторождения. Особенности освоения морских месторождений позволяют при этом создавать жилсоцбыткомплекс для семей работников предприятий в наиболее благоприятных условиях крупных портовых городов или других мегаполисов.

Главным преимуществом морских геотехнологий является то, что во многих случаях присутствие водных потоков и состояние массивов позволяют произвести в процессе выемки первичное обогащение полезных минералов или их агрегатов. Такая технология выемочных работ получила название *придонное обогащение*. К примеру, известные металлоносные конкреции имеют размеры от 5 до 50 м, поверхностную плотность до 30 кг/м<sup>2</sup> и залегают на поверхности илоносных отложений на глубинах 3000–6000 м. Применение обычных средств выемки, не учитывающих особенности океанических месторождений, привело бы к необходимости породозабора с каждого 1 м<sup>2</sup> поверхности практически 2 т отложений, подъема их с большой глубины, а затем к возврату практически тех же объемов породы на те же глубины. Разрабатываемые в ряде стран выемочные машины для таких условий используют классификационные принципы выемки, т.е. грохочение гранул при выемке.

Перенос процессов горного производства на борт морского судна, подвергающегося качке от волнений и ветровых воздействий, возможен только при создании оборудования, способного осуществлять выемку, подъем и выделение полезных компонентов в необычных для известных образцов оборудования условиях.

Структура морской физико-технической геотехнологии включает:

– основы вскрытия рабочих горизонтов подводных полигонов как совокупности принципов и технических решений по установлению грузовой транспортной связи между забоями и морскими судами или сооружениями, на которых перерабатывается горная масса;

– основы систем разработки как совокупности принципов и технических решений о порядке выполнения вскрышных, добычных и горно-подготовительных работ в течение всего периода разработки;

– основы учения о выемке и перемещении горных пород из массива до места их переработки или складирования, как в океанических водах, так и по морской поверхности;

– основы создания средств комплексной механизации подводных горных работ как совокупности принципов и технических решений по комплектованию цепи взаимосвязанных машин и механизмов, обеспечивающих экономичное и эффективное выполнение всех производственных процессов в увязке со вскрытием рабочих горизонтов и системами разработки.

Человечество обратило внимание на дно и недра морей и океанов как на источник получения минерального сырья еще в давние времена. Так, свыше 30 веков назад финикийцы на дне Средиземного моря разрабатывали отложения морских раковин, из которых изготавливали пурпурную краску. Добыча медной руды ныряльщиками производилась в III в. до н.э. с глубины 4 м вблизи о. Халка в проливе Босфор. Легенда гласит, что из этой руды Гераклом была отлита статуя Артемиды для ее храма. Известны разработки коралловых построек у берегов островов Полинезии в VI в. до н.э. В эпоху Средневековья на территории современной Великобритании производили добычу оловоносных песков на месторождении Левант.

В конце XIX – начале XX века строительство портов в устьях рек и необходимость поддержания глубин на их фарватерах определили появление морских землечерпательных снарядов. На их базе была создана первая морская паровая многочерпаковая драга (емкость ковша 205 л), позволяющая производить добычу полезных ископаемых на глубинах до 12 м. Она была применена в 1907 году для разработки оловоносных россыпей у берегов о. Пхукет (Таиланд). С середины XX в. из россыпей шельфа добывают руды золота, олова, титана, циркония, платины, железа, алмазы, строительные материалы. Более 70 предприятий в различных странах перерабатывают свыше 130 млн м<sup>3</sup> горных масс на шельфе. Валовая стоимость готовой продукции этих предприятий составляет около 2 % стоимости полезных ископаемых, добываемых на суше. В 1985 году за рубежом на шельфе работало более 2500 плавучих установок, производящих, в основном, добычу песка и гравия и дноуглубительные работы.

Разработка поверхностных месторождений шельфа производится открытым способом через водную толщу. В зависимости от горно-геологических, гидрометеорологических условий разработки месторождений применяют различные технические средства и методы добычи. Россыпи разрабатывают преимущественно многочерпаковыми, гидравлическими и грейферными драгами. Добыча полезных ископаемых осуществляется в основном однослойной или многослойной (при необходимости удаления вскрышных пород) системой выемок вскрышных пород и продуктивного пласта преимущественно с отвалами и хвостохранилищами

в выработанном пространстве. Подводную выемку ведут валовым способом или с придонным обогащением с целью получения черновых концентратов. Подъем породы в зависимости от конструкции морских земснарядов осуществляют гидравлическим или механическим способами. Первичное обогащение руд – на борту судна или на берегу. Доставка породы в отвал – морскими судами, самоотвозными снарядами, по плавучим пульпопроводам и другими способами.

Широкие перспективы намечены по освоению месторождений строительных горных пород, на которых в настоящее время добывают свыше 40 млн м<sup>3</sup> песка.

Эффективность добычных работ на шельфе определяется рациональностью принятых технологических решений. Это позволило сформировать новое фундаментальное понятие о россыпном месторождении как совокупности полигонов на россыпях различного генезиса, располагаемых в различных акваториях и в их прибрежных зонах, которые могут быть отработаны одним плавучим горно-обогащительным комбинатом. Такое понятие было необходимо, так как анализ параметров россыпных образований российского шельфа различного генезиса показал, что нет оснований прогнозировать крупные промышленные объекты моногенетического типа.

Научно-технический прогресс создал возможности для рационального и эффективного использования природных ресурсов Мирового океана, открыл широкие перспективы практического освоения его дна, добычи на нем нефти, газа, металлоносных конкреций и корок, золота и оловоносных песков, других полезных ископаемых. В связи с активизацией деятельности государств по освоению природных богатств океана остро встала проблема правового статуса и параметров территориальных вод, национальной принадлежности недр, свободы мореплавания и морских исследований. Свобода мореплавания особенно важна, так как на морских коммуникациях находится множество крупных судов с общим водоизмещением около 350 млн т.

Непосредственно к суше примыкает наиболее мелководная часть океана, известная как континентальный шельф. **Шельф, или континентальная отмель**, в традиционном понимании – прибрежная часть морского дна до глубины 100 фатомов или морских сажений (1 фатом  $\approx$  1,83 м). Обычно уклоны дна в пределах континентального шельфа не превышают 2°, а геологическое строение, как правило, не отличается от строения материков.

По данным географов, граница шельфа должна проходить по крутому перегибу дна, за которым начинается материковый или континентальный склон. Международный правовой режим континентального шельфа регулируется положением, в соответствии с которым это донное пространство рассматривается как продолжение земного массива прибрежного государства, его придаток. На этом основании на него распространяются суверенитет прибрежного государства и исключительное право на исследование и разработку природных ресурсов. Положение это зафиксировано Женевской конвенцией о континентальном

шельфе 1958 году. Но при этом прибрежная страна не обладает суверенитетной властью на воды в этих глубинах. Она ограничена зоной территориальных вод, которая для большинства государств не превышает ширины от 3 до 12 км за пределами сухопутной территории, внутренних или архипелажных вод. За пределами континентального шельфа, т.е. в зоне материкового склона, который круто снижается в сторону больших глубин, и находящегося за ним ложа океана или абиссали, действует принцип «общего достояния человечества»; следовательно, за этими пределами морское дно рассматривается как объект общего пользования всех государств и народов.

Решающим при оценке эффективности и выборе нетрадиционной технологии добычи в океане является соотношение риска и возможной прибыли при получении минерального сырья как из океанических, так и из альтернативных сухопутных источников. По данным американских горнодобывающих компаний, оптимальным следует считать вариант получения прибыли не менее 30 % против 10–15 % на месторождениях суши. В ходе предварительных оценок следует учитывать требования ООН об отчислениях ей в валюте в среднем в год за 20 лет эксплуатации порядка 10 % доходов от реализации металлов. Отсутствие на территории России предприятий по добыче марганцевых руд делает освоение океанического месторождения весьма предпочтительным. Уже сегодня можно прогнозировать, что в океане будет оконтурено месторождение, характеристики которого позволяют рассчитывать на прибыль не менее 22–50 %.

При использовании технологии и структур плавучих горно-обогажительных комплексов подводной добычи полезных ископаемых в состав россыпного месторождения на шельфе должны включаться объекты, расположенные не только в пределах данной морской акватории, но и в пределах всего морского субрегиона. Отдельное россыпное тело должно иметь запасы не менее 0,5 млн м<sup>3</sup> при залегании на шельфе одного моря и не менее 2 млн м<sup>3</sup> при залегании на шельфе морского субрегиона. При содержании полезного компонента на 25 % выше, чем минимальное промышленное содержание, в состав морского месторождения могут быть включены все россыпи шельфа субрегиона при суммарных запасах более 10 млн м<sup>3</sup>. Такие параметры определяются эффективностью, технологией и структурой механизации морской геотехнологии на месторождениях континентального шельфа. Эффективность определяется степенью сближения аппаратов выемки и передела. Наиболее эффективной структурой комплексной механизации являются схемы с максимальным приближением процесса передела к месту выемки, т.е. с размещением механизмов добычи и передела на борту добычного судна.

Формирование таких структур проводится с учетом особенностей гидродинамики процессов, когда положение вертикальной оси аппаратов колеблется из-за волнового воздействия на судно.

Разработан своеобразный тип горнодобывающего судна – ПлавГОК, на котором размещены установки выемки и передела. Очевидно, что эффективность

работы такой установки зависит от устойчивости судна, т.е. от влияния на процессы концентрации и добычи возмущений, возникающих из-за качки судна. Для распространенных полезных ископаемых параметры горнодобывающего судна и установок передела нужно выбирать такими, чтобы производство концентрата на судне при максимальном расчетном крене происходило с заданной рентабельностью.

Широкая экспериментальная проверка на судах различного водоизмещения (от 500 до 5000 т) и на флоте разведочно-эксплуатационного предприятия подтвердила возможность осуществления всех технологических процессов в условиях морских судов.

Морская геотехнология, как одна из наук физико-технической геотехнологии, в своем становлении прошла ряд этапов и представляет сегодня комплекс ряда дисциплин, изучающих фундаментальные связи природных и техногенных явлений в их взаимосвязях в процессе проведения горных работ в морской среде. К этим дисциплинам в первую очередь необходимо отнести прикладную океанологию, которая изучает деформацию дна формируемых горных выработок и формируемых насыпей под действием движения морских вод, а также особенности изменения гидродинамики морских вод при проведении горных работ, особенности массопереноса и устойчивости береговых и донных природных ландшафтов. Исследования в этой области необходимы для определения порядка вскрытия и систем разработки, позволяющих производить выемку полезных ископаемых без разубоживания и, более того, обеспечить вынос из забоя вмещающих пород.

Для того чтобы вызвать процессы восстановления морских россыпей, известных более как регенерация морских объектов (россыпи берегов Индии, Цейлона и т.д.), необходимо руководствоваться фундаментальными знаниями морской рудничной гидродинамики, вскрывающей изменчивость минерального и фракционного составов при определенной гидродинамической обстановке, намыва и размыва природных образований, насыщения и создания; дефицита морских потоков, особенности формирования и движения пульповых потоков и т.д. Для того чтобы горные работы имели определенный эффект, необходимы фундаментальные знания подводной маркшейдерии в области изучения законов распространения акустических и других колебаний в пульповых потоках, а также особенностей передачи координат в подводные полигоны и организации наблюдений за состоянием недр на океанических полигонах.

В основе морской геотехнологии как науки лежит учение об общих закономерностях организации и производства подводных горных работ на месторождениях Мирового океана на базе комплексной механизации всех этапов ведения горного производства. В настоящее время созданы научные основы технологии разработки россыпей шельфа с использованием плавучих горнообогатительных флотилий путем установки на морских судах добычного и перера-

батывающего оборудования и складированием хвостов обогащения и отвалов на морском дне, включающей в себя:

- выбор способа и схемы вскрытия рабочих горизонтов полигонов, а также местоположения и размеров подводных траншей и каналов;
- выбор систем разработки и конструкции; фронта работ;
- создание средств комплексной механизации добычи и переработки россыпей шельфа;
- гидродинамическую теорию квазистационарности протекания процессов на борту добычного судна;
- теорию движения пульповых потоков тонкозернистых материалов на подводном склоне и методы формирования подводных: отвалов и хвостохранилищ;
- схемы цепи аппаратов для получения стандартных концентратов (золота, олова, титана, циркония, железа и др.) на морских судах.

Для каждого типа промышленных россыпных месторождений определены основные технологии, а также возможности использования гидравлических или черпаковых структур комплексной механизации.

Разработка россыпей на шельфе требует создания технологических решений, исключающих или сокращающих подъем со дна вмещающих пород. Последнее особенно важно из-за негативного влияния на состояние морских вод сброса хвостов обогащения и вскрышных пород. Указанные горнотехнические особенности месторождений полезных ископаемых требуют создания решений с новыми технологическими потоками. Этим требованиям удовлетворяет технология подводной добычи полезных ископаемых с использованием комплексов на принципах «придонного обогащения».

Комплексы с придонным обогащением – это такие комплексы механизации подводной добычи полезных ископаемых, при которых в процессе отделения породы от массива и ее породозабора технические средства извлекают для последующего подъема полезный компонент (концентрат), а пустые породы оставляют на дне. Эффективность таких решений, позволяющих оставлять в забое 90 % и более горной массы, обусловлена сравнительно высокой степенью подготовленности песков к применению гравитационных и других методов концентрации.

Системы подводной разработки были сформированы исходя из особенностей промышленных типов морских месторождений, необходимости выемки кондиционных запасов без изменения их качества при статически устойчивом состоянии россыпных месторождений в момент создания готовых к выемке запасов. Разработаны одно- и многослойные, одно- и многобортовые системы, а также системы с внутренними или внешними отвалами.

В настоящее время ведут интенсивные наблюдения за существующим и возможным взаимодействием техногенных систем при горных работах на шельфе и в океане с природной фауной и флорой. По мере накопления данных

и установления закономерностей можно ожидать формирования такой научной дисциплины.

Морское горное дело формируется по мере изучения объекта разработки, его положения в природных системах.

**Основные научные задачи морской геотехнологии на современном этапе:**

– разработка научных основ геофизических методов подводной технологической разведки океанических полезных ископаемых с учетом изменчивости физических свойств горных пород при высоком гидростатическом давлении;

– разработка теории изменчивости свойств горных пород дна и недр Мирового океана в процессе выемки, подъема и обезвоживания на различных глубинах;

– разработка теории прогнозирования морских месторождений и их изменчивости при разработке, формировании морских отвалов в различных зонах океана и заносимости морских карьеров (полигонов) с регенерацией россыпных отложений в их поле;

– разработка теории обоснования граничных параметров шельфовых и океанических месторождений и главных параметров полигонов с учетом точности определения результативности горных работ и риска освоения нетрадиционных технологий;

– разработка теории устойчивости подводных откосов и выемок морских берегов во взаимосвязи с производством горных работ;

– разработка процессов выемки горных пород при придонном обогащении;

– разработка методов подъема полезных ископаемых с больших глубин и транспортирования на дальние расстояния;

– исследования принципов обогащения в морских условиях, в том числе в придонной зоне и на борту добычных судов;

– разработка технологии выемки вскрышных и добычных пород, обеспечивающей создание дефицита загрузки вдоль береговых потоков и догрузку их за счет вымывания вмещающих пород;

– разработка технических средств выемки, транспорта, переработки и складирования горных пород в различных горно-геологических и гидрометеорологических условиях, а также методов и техники инженерной защиты морской среды от негативного воздействия горных работ.

Однако океан сегодня может обеспечить получение не только металлов, но и энергии. Известно, что в зоне разломов, где формируются пока еще не оцененные горными инженерами сульфидные руды с высоким содержанием цинка, меди и других металлов, находятся «курильщики» с высокотемпературными гидротермами. Анализ показывает, что такое физическое состояние вод определяется гидростатическим давлением в зоне «курильщика». Незначительное изменение этого состояния за счет подъема вод приведет к образованию в трубо-

проводе пара, который по мере управляемого движения вверх будет отдавать свою энергию. Реализация энергии представляется в виде экологически чистого топлива – водорода с получением кислорода и солей.

Изученность шельфа России весьма низкая и в основном направлена на обеспечение нефте- и горнодобывающих отраслей промышленности. Шельфовые области – это части глобальной геоструктуры Земли – гешельфа, сформировавшегося в мезозое–кайнозое как система подвижных платформ (плит) между континентами и океаническими впадинами. Если внешние границы шельфовых областей обычно приурочены к бровке континентального склона, которая фиксируется региональными нарушениями и флексурами, то внутренние границы расположены, как правило, на континентах, вблизи тыловых швов приморских низменностей, куда доходили максимальные трансгрессии мезозойско-кайнозойских морей. Как правило, геологический поиск полезных ископаемых в недрах шельфа ограничен разведкой продолжений известных сухопутных месторождений в прибрежной зоне. По мнению японских и английских специалистов, подземная добыча твердых полезных ископаемых, в частности угля, экономична на глубине не менее 250 м ниже уровня моря и на расстоянии не более 25 км от берега. В настоящее время в различных странах подземным способом добывают уголь (более 100 шахт), железную руду, каменную соль, оловоносные руды и другие полезные ископаемые. И хотя уголь из морских недр Шотландии добывают уже с 1620 года, крупные месторождения были открыты в последние десятилетия в основном при поиске нефти и газа, а технологические схемы разработки предусматривают закладку стволов на суше или на островах с уходом горных выработок под дно моря. Шельфовую добычу ведут в Великобритании, Японии, Канаде, Чили и других странах. Обнаружены крупные угольные месторождения в недрах шельфов Турции, Китая, Австралии. Высокие оценки разведки крупных запасов, по мнению экспертов ООН, на шельфе северо-востока России, у берегов Сибири, а также на шельфе Аляски, США и других стран.

Рассматривая перспективность добычи подземными предприятиями ресурсов недр под океаном, необходимо отметить технологии с намывом искусственных островов или с возведением специальных платформ. Опыт использования таких технологий известен при разработке серного месторождения Купола Гранд-Айл под дном Мексиканского залива на расстоянии 11 км от берегов штата Луизиана. Добычу серы из пласта мощностью около 90 м с глубиной залегания сернистых горизонтов 800 м ведут с платформ общей длиной до 800 м, установленных на 20 м выше уреза моря глубиной 80–120 м по методу Фраша путем расплава серы, нагретой морской водой.

Наибольший промышленный интерес представляют месторождения непосредственно дна континентального шельфа России, площадь которого превышает 6 млн км<sup>2</sup>, и в первую очередь месторождения морских россыпей.

## 4.2. Физико-химическая геотехнология

**Физико-химическая геотехнология – это горная наука, занимающаяся изучением основных закономерностей горно-геологической среды, физических, химических и технологических процессов, происходящих в недрах земли при добыче через специальные скважины (дренажные выработки) полезных ископаемых, с изменением их физического, агрегатного или химического состояния.**

В результате проведенных исследований в области физико-химических геотехнологий создаются и развиваются технологии перевода твердого полезного ископаемого в подвижное состояние с помощью формирования на месте его залегания в недрах тепловых, массообменных, химических и гидродинамических процессов, что обеспечивает возможность извлечения его через скважины.

В современных условиях в связи с ростом потребления ресурсов недр возникает необходимость в отработке бедных и глубокозалегающих месторождений, в переработке старых отвалов бедных руд и хвостохранилищ, содержащих многие полезные ископаемые. Однако достигнутый уровень физико-технической геотехнологии не позволяет решать такие задачи при одновременном повышении экономической и экологической эффективности производства. Выход из этой ситуации требует поиска принципиально новых решений, одно из которых – соединение непосредственно в недрах операций по добыче полезных ископаемых с их переделом, что является задачей физико-химической геотехнологии (ФХГ).

ФХГ включает в себя три составные части определенного содержания: учение о горной среде; физико-химические основы воздействия на горную среду; учение о физико-химических методах геотехнологии.

**Цель ФХГ** как науки – установление возможности фазового превращения того или иного полезного ископаемого, развитие методов ФХГ-добычи и оптимизация параметров технологии, выбор вида рабочих агентов, способов их доставки к рудному телу, управление технологическим процессом доставки полезного ископаемого на поверхность и его дальнейшая переработка.

Для практического внедрения физико-химических методов добычи и переработки полезных ископаемых необходимо развитие теории ФХГ, т.е. комплекса взглядов, представлений и идей, направленных на объяснение основных процессов и явлений, дающих знания об основных закономерностях и связях при использовании этих методов. На данном этапе в теории ФХГ решающая задача – описание и логическое упорядочение эмпирического материала.

### 4.2.1. Основные понятия и определения

**ФХГ – наука о свойствах среды, процессах и технологиях добычи полезных ископаемых и средствах извлечения, осуществляемых без присутствия людей под землей.** Эта дисциплина наряду с горной средой, геотехнологи-

ческими процессами добычи и средствами извлечения изучает химию и физику явлений, протекающих при этом в недрах земли.

**Предметом ФХГ** как науки является изучение различных реальных объектов горной промышленности (месторождения, методы, средства добычи, процессы, явления т.д.), рассматривать которые надо во взаимосвязи с физико-геологическими условиями.

Наиболее полно характеризовать условия залегания месторождения полезных ископаемых при его разработке можно, используя понятие *«физико-геологическая обстановка»*, которое включает в себя характеристики геологических, гидрологических и геотермических условий залегания месторождения, а также физических и химических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород, рассматриваемых во взаимосвязи с возможными методами разработки.

Часть месторождения в зоне целенаправленного изменения состояния полезного ископаемого, представленная горной породой и насыщающими ее флюидами, правомерно характеризовать понятием *«горная среда»*. В отличие от горных пород, представляющих собой различные минеральные ассоциации, *горная среда* – это одна или несколько гетерогенных систем с различными компонентами, присутствующими в твердой, жидкой и газообразной фазах.

**Геотехнологическая система** – совокупность горной среды, физических или химических процессов добычи и средств для их реализации. В геотехнологической системе можно выделить ряд основных элементов. Например, таким элементом является узел приготовления рабочих агентов и переработки продуктивных растворов. Основным элементом является также транспортная магистраль – скважина, пробуренная в месте залегания полезного ископаемого, открывающая доступ рабочих агентов к залежи и обеспечивающая выдачу полезного ископаемого на поверхность.

**Рабочая зона** – часть горной среды, охваченной воздействием рабочих агентов, состоящая из различных фаз (твердой, жидкой, газообразной), образующих систему с однородными частями, разделенными физическими границами. Компоненты системы – вещества, из которых образуются все фазы данной системы. К физическим свойствам компонентов относятся плотность, электро- и теплопроводность и т.д. Свойства веществ, характеризующие их способность участвовать в химических реакциях (процессах превращения одних веществ в другие), называют химическими.

Геотехнологические свойства полезных ископаемых определяют их способность переходить в подвижное состояние с помощью размыва, растворения, выщелачивания, горения, плавления, возгонки и т.д. Геотехнологические процессы перевода полезных ископаемых в подвижное состояние разделяются на тепловые, массообменные, химические и гидромеханические.

**Основной принцип ФХГ** можно сформулировать как исследование процесса добычи и изменений горной среды под влиянием рабочих агентов с целью

перевода полезного ископаемого в подвижное состояние и извлечения его на поверхность, причем одно из возможных превращений для данной геотехнологической системы является доминирующим. Исходя из этого принципа в ФХГ следует выделить три основных направления:

1) изучение влияния физико-геологической обстановки и горной среды на процесс перевода полезного ископаемого в подвижное состояние;

2) изучение собственно превращений химического и физического характера (установление природы процесса и последовательности протекания отдельных стадий);

3) изыскание средств осуществления процессов добычи.

Конечная цель ФХГ – развитие геотехнологических способов добычи, прогнозирование протекания процессов и оптимизация параметров технологии.

Для осуществления технологического режима требуется решение целого комплекса научных, технических и экономических вопросов: выбор рабочих агентов и способ их доставки к рудному телу; управление технологическим процессом добычи (движением рабочих агентов в массиве, транспортированием полезного ископаемого на поверхность); переработка продуктивных флюидов. Решение этих вопросов должно обеспечивать высокую технологическую эффективность и экономическую рентабельность геотехнологических способов добычи.

#### 4.2.2. Методы физико-химической геотехнологии

Для ФХГ характерна универсальность подхода к изучаемым явлениям. На основе изучения процессов и средств бесшахтной добычи полезных ископаемых и воздействия на них химическими и физическими методами в геотехнологии используются методы физики, химии, геологии и горных наук, что позволяет количественно оценить происходящие процессы, обеспечить возможность их изучения и использования.

Физико-химические методы геотехнологии добычи таких полезных ископаемых, как соль, золото, сера, уран, железо, медь уже широко используются, а для ряда других еще только разрабатываются. Уровень их совершенства определяется уровнем развития ФХГ как науки.

Огромный вклад в развитие теории и практики ФХГ внесли Д.И. Менделеев, предложивший подземную газификацию угля; В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман, создавшие теоретические основы геохимических, а во многом и физико-химических процессов геотехнологии. В становлении геотехнологии как науки особые заслуги принадлежат акад. Н.В. Мельникову, основавшему в МГУ специальную кафедру и постоянно оказывавшему внимание всем вопросам геотехнологии – от определения ее понятий до практической реализации ее методов.

Оценивая положительно достигнутое, следует признать, что в целом качество и масштабы новых разработок еще не отвечают требованиям времени. Необходимо уже в ближайшие годы произвести существенные сдвиги в фундамен-

тальных разделах ФХГ, связанных с физикой и химией технологических процессов добычи и переработки. Следует выявить, какие механизмы физических, химических и физико-химических процессов могут обеспечить изменение агрегатного состояния полезного ископаемого и в каких условиях эти устойчивые минеральные ассоциации можно привести в подвижное состояние для их извлечения из недр. Важны исследования по избирательному растворению полезных компонентов, обуславливающему устойчивость технологического процесса растворения в недрах, по разработке эффективной технологии переработки добытых флюидов, по изысканию способов разупрочнения горного массива. Необходимы разработка методов решения многомерных, нестационарных задач теплообмена, химических превращений, подвижных границ фаз и поиск методов контроля и управления состоянием массива в процессе его разработки.

Следует отметить важность работ по геотехнологической оценке месторождений полезных ископаемых, ибо только благодаря ФХГ для горной промышленности становятся доступными многие забалансовые месторождения полезных ископаемых, отвалы бедных руд и старые хвостохранилища, содержащие много полезных компонентов.

В настоящее время бурно развивается микробиологическая наука. Однако результаты ее исследовательских разработок пока не готовы для промышленного использования из-за специфичности горно-геологических условий залегания руд отечественных месторождений.

Главные перспективы ФХГ связываются с решением ее химических аспектов, причем не только с поиском рабочих агентов для перевода полезного ископаемого в подвижное состояние, но и с их промышленным применением, решением проблемы всех сопутствующих реакций, а следовательно, с получением попутных продуктов, которые в большинстве случаев могут влиять как на основной процесс добычи, так и на переработку.

Следует отметить необходимость интенсификации работ по созданию эффективных техники и технологии бурения геотехнологических скважин, способов их подготовки к эксплуатации. Актуальна проблема эффективного сооружения наклонно направленных скважин, особенно для условий сложного залегания продуктивных пластов. Основная проблема при бурении технологических скважин – качество вскрытия продуктивного горизонта, т.е. подготовки месторождения для его эффективной разработки.

ФХГ должна внести значительный вклад в осуществление энергетической программы. Однако технологии подземной газификации, гидрогенизации и перегонки угля, сланца, битума, нефти в настоящее время разрабатываются медленно.

Учитывая вышесказанное, можно выделить основные научные направления ФХГ, связанные с решением следующих проблем.

1. Проблема сырья – ее решение предусматривает разработку критериев оценки и анализ месторождений с точки зрения геотехнологии.

2. Проблема новых технологий добычи – необходимо решение задач по установлению связей между физико-геологической обстановкой залежи, полезного ископаемого и вмещающих пород с рабочими веществами и средствами добычи.

3. Проблема новых технологий, связанная с решением задач по управлению процессом добычи и переработки, так как физико-химический геотехнологический процесс добычи – это процесс перевода вещества в новое состояние, в результате которого получают подвижные продукты реакции и далее – конечные вещества. Для этого надо знать, прогнозировать, управлять механизмом воздействия, последовательностью и взаимозависимостью элементарных процессов.

4. Проблема оборудования, обусловленная тем, что горная технология будущего должна отвечать ряду таких определяющих моментов, как малооперационность, поточность, простота в обслуживании и надежность, безотходность, малая энергоемкость, высокая производительность труда и низкая себестоимость. Следовательно, надо стремиться создавать прямые технологии превращения руды в целевые компоненты, а для их обеспечения разрабатывать новое горное оборудование, способное работать в сложных условиях.

5. Проблема переработки, утилизации добытых продуктивных флюидов, при решении которой значительный интерес представляют технологии на основе органических веществ – комплексонов, экстрагентов, обеспечивающих селективное извлечение ионов полезных компонентов.

Конечная цель физико-химической геотехнологии – повышение производительности и селективности добычи полезных ископаемых. В этом плане необходим поиск катализаторов, стимуляторов для регулирования технологических процессов.

Следует отметить особую роль ФХГ в социальном и экологическом плане, ибо с точки зрения охраны окружающей среды ее методы наиболее приемлемы и именно они обеспечивают безлюдную, безмашинную и поточную технологию добычи, позволяют вывести из забоя рабочих, создать им комфортные условия труда, отвечающие требованиям времени.

Методы ФХГ характеризуются следующими особенностями:

1. Разработка месторождений, как правило, ведется через скважины, которые служат для вскрытия, подготовки и добычи полезного ископаемого.

2. Месторождение рассматривается как объект добычи полезного ископаемого и место его частичной переработки, так как технология добычи предусматривает избирательное извлечение.

3. Рудник состоит из трех основных элементов: блока приготовления рабочих агентов; добычного поля (рудного тела, где протекает процесс); блока переработки продуктивных флюидов.

4. Инструментом добычи служат рабочие агенты (энергия или ее носители, вводимые в рабочую зону, например химические растворы, электрический ток, вода или другой теплоноситель).

5. Под воздействием рабочих агентов полезное ископаемое изменяет агрегатное или химическое состояние, образуя продуктивные флюиды (раствор, расплав, газ, гидросмесь), которые обладают высокой подвижностью и могут перемещаться.

6. Разработка месторождения зональна, а сам метод определяет размеры и форму рабочей зоны и ее перемещения в эксплуатируемой части месторождения.

7. Управление процессом добычи осуществляется с поверхности путем изменения параметров рабочих агентов (расход, температура, давление, концентрация и т.д.), места их ввода в залежь и отбора продуктивных флюидов.

Методы ФХГ можно классифицировать по процессам добычи, в основе которых – вид и способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние. Различают химические, физические и комбинированные методы добычи.

***Химические методы:***

– подземное растворение водой каменной, а также калийных, магниевых и урановых солей, сульфатов и сульфаткарбонатов, буры и др.;

– подземное выщелачивание растворами: кислот – серной (целестин, азурит, куприт, некоторые урановые минералы и др.), соляной (сфалерит, молибденит, уранит и др.) и азотной (аргентит, висмутин, сфалерит и др.); щелочей (бокситы, антимонит); солей – сернистого натрия, хлористого железа, цианистого калия (золото); других реагентов;

– подземная термохимическая переработка полезного ископаемого сжиганием (например, подземная газификация, угля, сланца, нефти) и обжигом (пирит, халькопирит, антимонит и др.).

***Физические методы:***

– подземная выплавка (серы, азокерита и др.);

– подземная возгонка (реальгара, киновари и др.);

– разрушение рыхлых пород струей воды (например, скважинная гидродобыча) и превращение их в плавучее состояние вибрацией или другими способами.

К ***комбинированным*** относятся методы, основанные на совместном использовании химических и физических процессов (например, выщелачивание металлов в электрических полях). К ним следует отнести также методы бактериального выщелачивания.

Возможность применения того или иного геотехнологического метода обусловлена геотехнологическими свойствами и физико-геологическими условиями залегания полезного ископаемого. Главным условием применения ФХГ является реальная возможность и экономическая целесообразность перевода полезного ископаемого под воздействием тех или иных рабочих агентов в подвижное состояние. Не менее важно обеспечить возможность подачи рабочих агентов к поверхности взаимодействия и отвод полезного ископаемого через скважины на поверхность.

#### 4.2.3. Основные направления развития физико-химической геотехнологии

В ФХГ можно выделить два основных направления: первое – изучение физико-геологических условий месторождения, второе – разработка технологии добычи полезных ископаемых, т.е. выбор способа вскрытия месторождения, процесса перевода полезного ископаемого в подвижное состояние, способов доставки, подъема, транспортирования и наиболее эффективных схем переработки добытого продукта. Следовательно, задача ФХГ как научной дисциплины – обоснование по факторам, характеризующим месторождение, выбора оптимальной технологической схемы процессов и средств добычи полезного ископаемого с учетом экономических и экологических аспектов для конкретных условий разработки. Для успешного развития ФХГ требуется также разработка критериев качественной и количественной оценки месторождений полезных ископаемых, определяющей пригодность их к разработке геотехнологическими методами.

Важнейшими задачами ФХГ являются также: изучение влияния горной среды на процессы перевода полезного ископаемого в подвижное состояние и изменения в связи с этим равновесия в геотехнологической системе; изучение собственно превращений химического и физического характера, а также кинетики процессов, сопровождающих изменения динамического равновесия системы; изыскание средств осуществления процессов добычи.

Важную роль в технологическом и экономическом отношении играет правильный выбор рабочего агента, состав и свойства которого определяются рядом факторов: физико-геологическим состоянием залежи; энергетическим эффектом, сопровождающим перевод полезного ископаемого в подвижное состояние; необходимым температурным диапазоном; технической осуществимостью генерирования энергии в залежи и др. Особую актуальность имеют задача снижения потерь полезного ископаемого и вопросы охраны окружающей среды.

Основой анализа и принятия решений по элементам технологии должно стать математическое моделирование геотехнологических систем. Создание алгоритмов оптимальной эксплуатации и управления процессами и их комплексами составляет основу теоретических разработок в геотехнологии. При этом необходимы, с одной стороны, детальное изучение отдельных геотехнологических процессов добычи с выявлением конкретных параметров их производства, характерных для каждой определенной геотехнологической системы, с другой – типизация основных процессов ФХГ (тепловых, диффузионных, кинетических), установление общности их математического описания и автоматического управления.

Управление технологическим режимом добычи, процессами тепло- и массопереноса в горном массиве, выбор параметров системы разработки и другие технологические вопросы процесса добычи должны базироваться на детальном изучении свойств горной среды, ее геологического строения и гидрогеологиче-

ских условий залегания месторождения, физико-геологической характеристики залежи. Это обеспечит возможность расчетного определения параметров технологии и конструкции системы добычных скважин.

Вопросы доставки полезного ископаемого на поверхность и его дальнейшей переработки решают в зависимости от фазового состояния, в которое преобразуется полезный компонент в горном массиве. Транспортная магистраль для доставки полезного ископаемого на поверхность в одних случаях может быть совмещена со скважинами, которые используют для подачи рабочего агента к залежи, в других случаях доставку осуществляют по специально пробуренным скважинам (дренажным каналам).

#### 4.2.4. Физико-геологические основы физико-химической геотехнологии

Очевидно, не всякое месторождение целесообразно и эффективно разрабатывать методами ФХГ, и именно физико-геологические основы определяют условия применения этих методов. Получение достоверных исходных данных о физико-геологических условиях существования месторождения в земных недрах – главная задача геолого-гидрологического цикла наук, рассматриваемых в сфере ФХГ. Решение этой задачи сводится к исследованию физико-геологических факторов, определяющих возможность использования методов ФХГ, к оценке месторождений с точки зрения возможности и целесообразности их разработки этими методами, обоснованию требований к изученности месторождений, разработке методики их разведки и подготовки, а также геологического обслуживания предприятий.

Для методов ФХГ чрезвычайно важно знать строение и структуру горных пород, которая определяется размерами, формой и взаимным расположением зерен, агрегатов, включений, их сложение (текстуру) – пространственное взаиморасположение минеральных масс, форму залегания, литологический состав горных пород. При этом наибольшее значение имеет оценка геотехнологических свойств полезных компонентов, способность полезного ископаемого к фазовым превращениям.

Важную роль в отдельных видах технологий играют гидравлические свойства горных пород – способность вмещать и удерживать воду, водоотдача, сохранение связности, консистенции и прочности при взаимодействии с водой, водоустойчивость, капиллярность, набухание и усадка при усыхании, смачиваемость, адсорбция, абсорбция и адгезия.

Тепловые свойства полезных ископаемых лежат в основе методов ФХГ, использующих свойство части горной породы при определенной температуре переходить из твердой в жидкую или газообразную фазу. Способность к фазовым превращениям, имеющим физический характер, подразделяется на плавление, испарение, сублимацию, кристаллизацию и конденсацию. Кроме этого, для расчета технологических параметров, основанных на использовании тепловых

свойств горных пород, необходимо исследовать теплопроводность, теплоемкость, тепловое расширение или сжатие при изменении температуры.

Интенсификация химических и физических процессов достигается при наложении электрических, магнитных и радиационных полей на горную породу.

К **электрическим свойствам** горных пород относятся электропроводность, электрическая прочность, т.е. способность сопротивляться разрушающему действию электрического напряжения, поляризация горной породы; к **магнитным свойствам** – магнитная восприимчивость и остаточная намагниченность; к **радиационным** – естественная радиоактивность и способность горных пород поглощать  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение, а также нейтронное излучение.

К **механическим свойствам** горных пород относятся тиксотропность, прочность, твердость и вязкость разрушения, упругость, пластичность и хрупкость материала, слагающего полезное ископаемое.

Необходимо также знать акустические свойства горных пород, их плотность. Успех разработки месторождений методами ФХГ зависит прежде всего от физико-геологических факторов, т.е. движущих сил какого-либо процесса, а также от условий, в которых этот процесс протекает. Эти факторы подразделяются на внутренние и внешние. Внутренние факторы – это свойства химических элементов и их агрегатов давать подвижные соединения. К внешним факторам относятся параметры среды, физико-геологической обстановки – температура, давление, кислотность и др. Для каждого месторождения выявляется свой перечень факторов, в различной степени влияющих на экономику процесса добычи.

На параметры процесса добычи существенное влияние оказывают следующие физико-геологические факторы:

- химико-минералогический состав залежей и вмещающих пород, определяющих характер их взаимодействия с рабочими агентами;

- содержание полезного компонента в залежи; механические свойства материала залежи и вмещающих пород, определяющие кроме возможности перевода полезного ископаемого в подвижное состояние ход процесса сдвижения налегающей толщи пород, т.е. управление горным давлением при ведении процесса добычи;

- химический состав подземных вод и связанные с ним плотность и вязкость, определяющие скорость и характер распространения по залежи рабочих агентов, а также возможность использования пластовых вод для приготовления рабочих агентов и условия промышленного сброса вод;

- условия питания и разгрузки подземных вод, их связь с выше- и нижележащими горизонтами;

- пористость, текстура и структура залежи; проницаемость залежей, являющаяся для многих геотехнологических методов необходимым условием осуществления процесса добычи;

- неоднородность проницаемости рудной залежи, которая, как правило, затрудняет ведение процесса добычи, поскольку проницаемые участки служат ка-

налами движения рабочих агентов, а непроницаемые – остаются вне сферы их действия.

Таким образом, круг основных факторов, влияющих на условия добычи полезных ископаемых методами ФХГ, охватывает многие свойства залежей. В связи с этим одной из важнейших задач является выявление степени влияния каждого фактора на возможность и эффективность применения конкретных методов и их качественная и количественная оценки, что, в свою очередь, обеспечит возможность установления корреляционных связей между факторами и экономическими показателями отработки месторождения.

Изучение влияния физико-геологических факторов на условия применения методов ФХГ для разработки месторождений позволило уже сейчас сформулировать требования к месторождениям, пригодным к такой отработке, а также установить необходимую степень их изученности.

Используемый технологический способ должен гарантировать заданное извлечение полезного ископаемого из недр и быть экономичным, химический и минералогический состав полезного ископаемого должен обеспечивать возможность перевода его в подвижное состояние, вмещающие породы – возможность проведения технологического процесса по извлечению полезного ископаемого (поддержание необходимой температуры, давления, устойчивости), а морфология залежи, текстура и структура руд – доступ рабочих агентов к полезному ископаемому. Перечисленные требования конкретизируют применительно к каждому методу.

#### 4.2.5. Физико-химические основы геотехнологических процессов

В основе методов ФХГ лежат физические и химические процессы. Первые сопровождаются изменением формы, внешнего вида, физических свойств полезного ископаемого (например, плавление серы, гидравлическое разрушение руды и т.д.), вторые – изменением химического состава и свойств полезного ископаемого (например, горение угля, выщелачивание урана, меди и т.д.). Процесс добычи полезного ископаемого сопровождается движением жидкостей и газов по залежам полезного ископаемого, добычным скважинам, трубопроводам и аппаратам.

Естественно, что каждая технология включает в себя несколько различных рабочих процессов: основной – добыча полезного ископаемого, вспомогательные и обеспечивающие. Реализация геотехнологических процессов добычи требует их всестороннего изучения, а также учета процессов сдвижения горных пород под влиянием сил горного давления.

При ведении технологического процесса добычи взаимосвязь химических процессов в недрах очень сложная и может быть описана системой уравнений, совместное решение которых практически невозможно. Поэтому обычно рассматривают отдельные стороны процесса, определяемые основной химической реакцией и ее особенностями. Практический интерес представляет установление

степени влияния различных факторов на равновесие системы и выбор способов, позволяющих «сдвинуть» это равновесие в сторону целевых продуктов под действием температуры, давления или концентрации рабочего агента.

В промышленных условиях, как правило, процесс рассматривается на макроуровне, поэтому следует изучать взаимодействие агрегатов молекул, которые сопровождаются диффузией, конвекцией рабочих и продуктивных флюидов в зоне реакции, выделением и распределением тепла.

Практически все геотехнологические процессы относятся к гетерогенным. Примером может служить подземная газификация угля, где сам процесс подразделяется на пять стадий:

- 1) внешняя диффузия кислорода через пограничный газовый слой;
- 2) внутренняя диффузия кислорода через слой выгоревшего угля;
- 3) химическая реакция;
- 4) внутренняя и 5) внешняя диффузия продуктов реакции через слой золы и пограничный слой газа.

В химических процессах геотехнологии можно выделить три одновременно происходящих процесса: диффузию рабочих агентов к границе раздела фаз, саму химическую реакцию и диффузию продуктивных флюидов из зоны реакции. Скорость реакции зависит от температуры и концентрации реагирующих компонентов.

С помощью различных растворителей эффективно переводить в подвижное состояние многие полезные ископаемые. Такой перевод происходит в результате процессов растворения и выщелачивания, которые различаются по механизму взаимодействия растворителя и растворяемого вещества. Собственно **растворение** протекает без нарушения химического состава полезного ископаемого (в результате диффузии и межмолекулярного взаимодействия). Этот процесс лежит в основе технологии скважинной добычи растворимых в воде солей – галита, сильвинита, бишофита и др.

Растворение, сопровождающееся изменением данного вещества как химического соединения с переводом его в раствор, называется **выщелачиванием**. Методом подземного выщелачивания извлекают из руд металлы, их соли и окислы. В качестве выщелачивающих агентов используют кислородные кислоты (серную, азотную, фосфорную, сернистую) и бескислородные (соляную, сероводородную), а также водные растворы солей (соды, сернистого натрия, сернистокислых солей щелочных металлов). При выщелачивании процесс массопередачи протекает по крайней мере в двух кинетических областях, характеризующихся коэффициентами внешней и внутренней диффузии.

Природа растворяемого вещества и растворителя определяет энергию и характер их взаимодействия, а также растворимость, т.е. способность вещества равномерно распределяться в том или ином растворителе. Понятие растворимости как концентрации насыщенного раствора применимо лишь в случае физического растворения. Химическое же растворение (выщелачива-

ние), как правило, осуществляется в условиях практической необратимости процесса.

**Термическое воздействие** на горные породы изменяет агрегатное состояние вещества таким образом, что приобретает форму, удобную для доставки полезного ископаемого к скважине и на поверхность (жидкость, газ), а также физические свойства (например, уменьшение вязкости), улучшая условия фильтрации полезного ископаемого к добычным скважинам. Указанные фазовые превращения обычно являются эндотермическими процессами и требуют подвода тепловой энергии. Нагрев горного массива может быть осуществлен передачей тепла с помощью различных видов теплоносителя, воздействием на залежь электромагнитным полем, экзотермическими реакциями (путем окисления химически активных компонентов полезных ископаемых), а также за счет тепла, выделяющегося при ядерной реакции.

В процессе **гидравлического разрушения** происходит нарушение связей в горной породе и образование взвеси – дисперсной системы, в которой дисперсная фаза представлена рудой грубого гранулометрического состава, а дисперсная среда – рабочим агентом (жидкостью). Для диспергирования наиболее перспективны породы без жестких связей, которые делятся на две группы: относительно связные (глинистые, лессовидные) и рыхлые. Необходимым условием перехода породы в пловунное состояние является или полное отсутствие у нее структурных связей, или настолько резкое их ослабление (например, под динамическим воздействием), что они не могут противостоять тем напряжениям, которыми обусловлено движение пловуна. Способность к проявлению пловунности зависит от условий естественного залегания, влажности породы, гранулометрического и минералогического составов, наличия глинистых фракций, засоленности и др. Пловунные породы делятся на истинные пловуны и псевдопловуны. К первым относятся породы, содержащие коллоидные фракции. Разжижение пловунов такого рода обусловлено обратимыми переходами насыщающей их связанной воды в подвижное состояние (свойство тиксотропности).

Практически гидромониторной струей можно разрушить породы любой крепости, однако такое разрушение применяется в основном при разработке песков, супесей, глинистых песчаников, алевролитов и реже при разработке углей, аргиллитов, мергелей, сланцев, известняковистых песчаников и др. Механизм разрушения зависит от физико-механических свойств горных пород, условий течения струи и обусловлен одновременным проявлением различных сил (удар, динамическое давление, фильтрационные силы и др.).

Разрушение естественной структуры связных горных пород возможно следующими способами: механическим (породоразрушающий механизм, струя воды, вибрация, взрыв), микробиологическим (разложение цементирующего вещества), разупрочнением связности с помощью ПАВ. Разрушение же естественной структуры рыхлых горных пород (песчаные, крупноблочные) возможно механическим и микробиологическим способами. Способы воздействия на по-

роды с целью разрушения структуры пород и перевода их в подвижное состояние зависят от прочности, текстурно-структурных характеристик, а также от гранулометрического состава пород.

Воздействие электромагнитных полей, промышленной высокой и сверхвысокой частот на горную среду преследует цели получения теплового и термомеханического эффекта, интенсификации химических реакций, процессов диффузии и фильтрации. Сущность электрического нагрева горной среды заключается в превращении части электрической энергии в тепловую непосредственно на месте залегания полезного ископаемого за счет диэлектрических потерь. Обладая большой проникающей способностью, электромагнитные поля способствуют ускорению химических процессов, протекающих внутри значительного объема среды, и являются более эффективными, чем химические катализаторы, действие которых возможно лишь при поверхностном контакте с горной средой. Разрушение массива может быть достигнуто за счет термоупругих напряжений, возникающих в локально разогретых областях. Кроме того, за счет возникновения высоких температур вокруг проводящих включений происходит интенсификация химических реакций. Все это приводит к значительному увеличению фильтрационной способности горной породы.

Движение рабочих агентов и продуктивных флюидов осуществляется под действием гидродинамического градиента давления, гидростатического напора, конвективных, гравитационных и диффузионных сил. Режим движения флюидов в залежи определяется преобладающим действием одной из указанных сил. Основные режимы движения флюидов – напорное в свободном пространстве (например, при подземном растворении солей) и гравитационное – в поровом, когда рабочие растворы стекают под действием силы тяжести в виде тонких пленок. Капиллярные силы способствуют впитыванию рабочего раствора в узкие каналы и мелкие поры, а диффузионные обеспечивают перемещение выщелачивающего раствора и продуктов реакции.

Все геотехнологические процессы происходят на поверхности контакта полезного ископаемого, вмещающей породы и рабочего агента. Всякая поверхность, отделяющая одну фазу от другой, сильно отличается по своим физико-химическим свойствам от внутренних объемов граничащих фаз. Граничные поверхности обладают запасом свободной поверхностной энергии, обусловленной особым положением молекул в пограничном слое. Поэтому особое значение приобретает установление влияния этих процессов на свойства среды и эффективность технологии добычи.

Разработка месторождений полезных ископаемых геотехнологическими методами связана с подъемом извлекаемых флюидов на поверхность через скважины. Процесс подъема может осуществляться за счет энергии нагнетаемого рабочего агента (например, подземное растворение солей) либо вводимого в скважину сжатого воздуха или газа (например, подземная выплавка серы и др.), а также при использовании погружных насосов и гидроэлеваторов.

#### 4.2.6. Технологические аспекты методов физико-химической геотехнологии

Весь технологический процесс добычи можно подразделить на единичные процессы, большинство из которых хорошо изучено, а для их расчета разработаны теоретические основы и методы реализации. В то же время в отличие от идеальных сред и процессов, где на основе известных законов можно найти одно определенное решение, в горном производстве прежде всего нужно учитывать экономические параметры технологии, обусловленные рядом факторов.

Создавая процесс, нужно руководствоваться прежде всего поиском решений оптимальных с технической, а следовательно, и экономической точки зрения, т.е. целесообразно стремиться к максимальному, экономически оправданному извлечению полезного ископаемого.

Проведенные исследования позволили установить технологические принципы, согласно которым процесс добычи должен быть реализован при наибольшем извлечении и наилучшем использовании энергии и оборудования, при оптимизации режимов процесса, наименьшем нарушении окружающей среды и создании наиболее комфортных условий труда.

**Средства добычи и управления.** Оборудование для геотехнологических методов добычи подразделяется по назначению и расположению в технологической схеме на следующие основные группы:

- для сооружения скважин; для подготовки рабочих агентств;
- для поверхностного обслуживания скважин; для добычи полезных ископаемых;
- для транспортирования и предварительной переработки продуктов добычи на поверхности;
- для контроля технологического процесса в автоматизированной системе управления.

**Вскрытие и подготовка месторождений к эксплуатации.** Подготовка месторождения к эксплуатации – комплекс работ по доразведке месторождения и его вскрытию, т.е. сооружение добычных скважин, их исследование и монтаж оборудования.

В методах ФХГ скважины – основные выработки, вскрывающие залежь полезного ископаемого, подготавливающие ее к разработке и служащие для транспортирования рабочих и продуктивных флюидов. Поэтому эффективность работы всего геотехнологического предприятия зависит в первую очередь от работы буровиков, задача которых – не только найти новые технические и технологические решения, сокращающие затраты труда при бурении скважин, но и резко улучшить качество вскрытия продуктивных пластов.

Вторая, не менее важная проблема – эффективное сооружение наклонно направленных скважин, в том числе при сложном залегании продуктивных пластов.

Особое внимание необходимо уделить качеству вскрытия продуктивного горизонта, т.е. подготовке месторождения для его эффективной разработки через скважины.

Выбор способа вскрытия и область его применения зависят от многочисленных факторов, главные из которых:

- технологическая схема разработки;
- размеры месторождения в плане;
- мощность, угол падения и глубина залегания залежи;
- физико-механические свойства залежи и вмещающих пород;
- рельеф поверхности и др.

**Системы разработки** при добыче полезных ископаемых методами ФХГ классифицируются следующим образом:

- системы разработки отдельными скважинами-камерами;
- системы разработки взаимодействующими скважинами (подземная выплавка серы, подземное выщелачивание металлов, сплошная разработка месторождений каменной соли, подземная газификация угля и т.д.);
- системы разработки, сочетающие традиционную технологию добычи со скважинной (подземное выщелачивание металлов);
- системы разработки, характерные для традиционных методов добычи полезных ископаемых, но использующие геотехнологический принцип перевода полезных ископаемых в подвижное состояние (подземное выщелачивание металлов, кучное выщелачивание полезных ископаемых и др.).

Исходными данными для выбора системы разработки служат заданная или возможная производственная мощность предприятия и физико-геологические условия залегания полезного ископаемого.

При анализе факторов, влияющих на систему разработки, для каждого конкретного месторождения необходимо выделять главный и второстепенный факторы. К главному следует относить какое-либо основное свойство или фактор, которое определяет существо данного метода отработки месторождения. Например, для одних геотехнологических методов таким фактором будет проницаемость, для других – текстура и структура полезного ископаемого, для третьих – гидрогеологические условия залежи и т.д.

Выбрать систему разработки – значит определить направление отработки залежи в целом и установить оптимальную сетку размещения скважин, обеспечивающую технологичность выемки полезного ископаемого и получение наилучших технико-экономических показателей.

Технико-экономические показатели метода, с одной стороны, определяются исходными физико-геологическими условиями разрабатываемого месторождения, с другой – принимаемыми техническими и технологическими решениями. Параметры технологии (управляемые величины, характеризующие процесс добычи) определяют показатели метода для его экономической оценки и сравнения как по структуре капитальных вложений, так и по размерам эксплуатацион-

ных и трудовых затрат. Экономические условия разработки связаны также с географией месторождения.

Технические, технологические и конструктивные решения (предельная глубина, средства бурения, добычи, подъема и транспорта, расстояние между скважинами, их диаметр, параметры рабочих агентов, извлечение полезного ископаемого из недр и т.д.) в основном определяются экономической целесообразностью в соответствии с условиями разработки и техническими возможностями сегодняшнего дня.

**Экологические и социальные аспекты методов ФХГ.** Любое существующее горное производство в той или иной степени негативно воздействует на окружающую среду. Но отрицательное влияние горного производства на экологическую систему следует расценивать лишь как результат несовершенства методов добычи.

Качественно новый этап в развитии горного производства – скважинные методы добычи, более рациональные с точки зрения взаимоотношений человека и природы, существенно уменьшают вредное воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными горными способами, что имеет большое социально-экономическое значение.

С точки зрения охраны окружающей среды прогрессивность физико-химических геотехнологий заключается не в предотвращении воздействий на среду вообще, что сдерживало бы внедрение современных методов и ввод новых мощностей, а в снижении уровня вредного влияния и защите экологических систем от нагрузок, превышающих допустимые пределы. В самой сущности геотехнологических методов заключено требование охраны окружающей среды. Добыча через скважины позволяет исключить образование отвалов, а последующая рекультивация – сохранить пахотные земли. Однако даже коренное изменение технологии добычи не исключает проблемы регулирования качества среды и ее загрязнение.

Социальные последствия использования физико-химических геотехнологий выражаются в изменении места и роли человека в процессе добычи, а также в изменении содержания и характера его труда.

Важнейший аспект социальной проблемы – уменьшение опасности условий труда – связан с существенными изменениями характера труда рабочего. Все процессы по подготовке к добыче легко поддаются механизации, а сами процессы добычи (закачка и откачка рабочих агентов и продуктивных флюидов) могут быть автоматизированы. Вероятность несчастных случаев и возникновения профессиональных заболеваний значительно ниже, чем при традиционных способах добычи. Практика работ геотехнологических предприятий подтверждает резкое снижение производственного травматизма. Так, за последние 10 лет добычи серы подземной выплавкой не было ни одного случая тяжелого травматизма, а легких травм стало гораздо меньше, чем при открытой разработке.

#### 4.2.7. Основные направления научных исследований и задачи физико-химической геотехнологии

Эффективность и действенность, экологическая и социальная значимость физико-химических геотехнологий ставят их в один ряд с принципиально новыми направлениями в науке и технике.

**Основными направлениями научных исследований в области ФХГ** являются:

создание физико-геологических основ геотехнологических методов добычи полезных ископаемых и технических средств их осуществления без присутствия людей под землей;

развитие теоретических основ процессов физико-химической геотехнологии (средств добычи и управления процессом добычи, вскрытия и подготовки месторождения, системами разработки) в условиях экологических, экономических и социальных ограничений;

создание технологии скважинной гидродобычи (СГД) твердых полезных ископаемых, залегающих в сложных горно-геологических условиях;

создание физико-химических геотехнологий добычи благородных, цветных и редких металлов.

Указанные направления включают в себя широкую область исследований по изучению геологических и гидрогеологических условий залегания месторождений, режимов поведения пласта в процессе разработки, режимов управления процессом добычи с целью максимального извлечения, условий и средств взаимодействия рабочих агентов пласта, химических и физических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород, систем разработки залежи через скважины, экономических аспектов проблемы и др. Все эти исследования тесно связаны между собой методически, имеют общую целенаправленность и являются элементами единого научного комплекса.

**Основными задачами ФХГ** являются:

I. Физико-геологические, включающие в себя разработку методики разведки месторождения для скважинной добычи и критериев оценки качества и экономичности освоения месторождения, определение сырьевой базы ФХГ и способов локализации отработанных участков месторождений, а также изучение влияния скважинной добычи на окружающую среду, режим и состав подземных вод.

II. Технологические, включающие в себя вскрытие и подготовку месторождения с учетом выбора конкретных месторождений, рациональной схемы способов и средств воздействия на призабойную часть пласта и участка месторождения, рациональной схемы оборудования добычных скважин; выбор технологии выемки, схемы отработки месторождения; разработка рациональных способов движения рабочих и продуктивных флюидов по залежи и в скважине; раскрытие механизма воздействия рабочих флюидов на рудное тело и вскрышные породы; изыскание способов интенсификации технологических процессов добычи; изы-

скание способов и средств уменьшения потерь в недрах и попутного обогащения добытых продуктов непосредственно около добычной скважины; определение потерь и разубоживания; обоснование способов управления горным давлением и системы разработки.

III. Проектно-конструкторские, предусматривающие разработку скважинного модульного оборудования и соответствующих подъемно-транспортных механизмов, агрегатов для добычи погребенных месторождений с водной поверхности, а также создание специализированного ряда буровых станков для бурения геотехнологических скважин диаметром 300–400 мм.

IV. Техничко-экономические и экологические, предусматривающие разработку методик экономической и экологической оценки работы геотехнологических предприятий, создание технико-экономической модели и алгоритмов оптимального управления скважинной добычей, разработку экологического мониторинга и т.д.

V. Автоматизации и управление, заключающиеся в выборе минимально необходимого числа параметров контроля, точек их отбора и частоты контроля, выборе и разработке средств КИП и автоматики, разработке системы автоматического поддержания геотехнологического режима добычи, а также алгоритмов сбора и обработки первичной информации и управляющих воздействий.

#### Список литературы к разделам 4.1 и 4.2

1. *Агошков М.И.* Развитие идей и практики комплексного освоения недр / Ин-т проблем комплексного освоения недр АН СССР. – М., 1984.
2. *Агошков М.И., Терентьев В.И., Симкин Б.А.* Комплексный трехъярусный открыто-подземный способ разработки мощных рудных месторождений / Ин-т проблем комплексного освоения недр АН СССР. – М., 1985.
3. *Анистратов Ю.И.* Технология открытой добычи руд редких и радиоактивных металлов. – М.: Недра, 1988.
4. *Арене В.Ж., Исмаилов Б.В., Шпак Д.Н.* Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980.
5. *Аренс В.Ж.* Физико-химическая геотехнология: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 656 с.
6. *Арсентьев А.И.* Вскрытие и системы разработки карьерных полей. – М.: Недра, 1984.
7. *Арсеньев С.Я., Прудовский А.Д.* Внутрикарьерное усреднение железных руд. – М.: Недра, 1980.
8. *Батманов Ю.К.* Техническое перевооружение угольных шахт. – М.: Недра, 1984.
9. *Беляков Ю.И.* Выемочно-погрузочные работы на карьерах. – М.: Недра, 1987.

10. *Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И.* Разработка руд на больших глубинах. – М.: Недра, 1982.
11. *Бурчаков А.С., Гринько Н.К., Черняк И.А.* Процессы подземных горных работ. – М.: Недра, 1982.
12. *Бусырев В.М.* Рациональная эксплуатация слюдяных месторождений. – Л.: Наука, 1987.
13. *Виницкий К.Е.* Управление параметрами технологических процессов на открытых разработках. – М.: Недра, 1984.
14. Воспроизводство вскрышных и подготовленных запасов угля на шахтах / *М.И. Устинов [и др.]*. – М.: Недра, 1990.
15. *Вызов З.Ф.* Усреднительные системы на горно-обогатительных предприятиях. – М.: Недра, 1988.
16. *Вылегжанин В.Н., Витковский Э.И., Потанов В. П.* Адаптивное управление подземной технологией добычи угля. – Новосибирск: Наука, 1987.
17. Высокопроизводительные глубокие карьеры / *М.Г. Новожилов [и др.]*. – М.: Недра, 1984.
18. *Грачев Ф.Г.* Теория и практика усреднения качества минерального сырья. – М.: Недра, 1983.
19. Добыча полезных ископаемых со дна морей и океанов / *Г.А. Нурок [и др.]*. – М.: Недра, 1970.
20. *Ельчанинов Е.А.* Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ. – М.: Недра, 1989.
21. *Каплунов Д.Р., Манилов И.А.* Стабилизация качества руды при подземной добыче. – М.: Недра, 1983.
22. *Ковалев О.В., Калимов Ю.И., Шишкин В.П.* Технология добычи и обогащения углей в Печорском бассейне. – М.: Недра, 1984.
23. *Козловский Е.А.* Россия: минерально-сырьевая политика и национальная безопасность. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та. – 2002. – 848 с.
24. Комплексная механизация процессов циклично-поточной технологии на карьерах / *Б.А. Симкин [и др.]*. – М.: Недра, 1985.
25. *Котенко Е.А., Штейнберг А.Б.* Технология открытой разработки пологозалегающих месторождений с транспортно-отвальными перемычками. – М.: Специнформцентр, 1981.
26. *Крашнин И.С.* Разработка пологих пластов в неустойчивых породах. – М.: Недра, 1986.
27. *Курленя М.В., Штеле В.И., Шалауров В.А.* Развитие технологии подземных горных работ. – Новосибирск: Наука, 1985.
28. *Лобанов Д.П., Ведерникова Л.П.* Микробиологическое выщелачивание / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1985.
29. *Лось И.Н.* Научные основы комбинированной разработки угольных месторождений. – Новосибирск: Наука, 1991.

30. *Мальшев Ю.Н., Ильин В.И., Михеев О.В.* Конструирование рациональных схем вскрытия и подготовки новых горизонтов при реконструкции шахт / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1994.
31. *Мальшев Ю.Н., Михеев О.В.* Новые технологические и технические решения подземной угледобычи. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 72 с.
32. *Мельников Н.Н., Усынин В.И., Решетняк С.И.* Циклично-поточная технология с передвижными дробильно-погрузочными комплексами для глубоких карьеров / Кольский науч. центр РАН. – Апатиты, 1995.
33. *Методы прогноза и способы предотвращения выбросов газа, угля и пород / Ю.Н. Мальшев [и др.].* – М.: Недра, 1995.
34. *Михеев О.В., Виткалов В.Г.* Подземная разработка пластовых месторождений: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 488 с.
35. *Михеев О.В., Мальшев Ю.Н., Евтушенко А.Е.* Совершенствование технологии отработки пластов Кузбасса, осложненных геологическими нарушениями / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1994.
36. *Михеев О.В., Некрасов В.В., Попков М.П.* Новые технологические решения по вскрытию, подготовке и отработке угольных месторождений Кузбасса / Моск. геол. ин-т. – М., 1993.
37. *Мосинец В.Н., Авдеев О.К., Мельниченко В.М.* Безотходная технология добычи радиоактивных руд. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
38. Научно-технический прогресс в горнодобывающей промышленности: проблемы обоснования направлений и реализации / *Н.Н. Чаплыгин [и др.]* / Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 1990.
39. Научные основы технического перевооружения подъемных рудников / *Д.Р. Каплунов [и др.].* – М.: Наука, 1992.
40. *Нурок Г.А.* Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985.
41. Открыто-подземный способ освоения месторождений крепких руд / *М.И. Агошков [и др.]* / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 1992.
42. *Панин И.М.* Подготовка рудных месторождений к очистной выемке. – М.: УДН, 1988.
43. *Панфилов Е.И.* Управление извлечением запасов из недр при разработке рудных месторождений / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 1985.
44. Подземная разработка железистых кварцитов / *Г.М. Бабаянц [и др.].* – М.: Недра, 1988.
45. Подземная разработка полиметаллических руд / *И.Е. Ерофеев [и др.].* – М.: Недра, 1990.
46. Развитие подземной добычи при комплексном освоении месторождений / *Д.Р. Каплунов [и др.].* – М.: Наука, 1992.
47. Развитие техники и технологии открытой угледобычи / *М.И. Шадов [и др.].* – М.: Недра, 1987.

48. Рациональное природопользование в горной промышленности / В.А. Харченко [и др.] / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1995.
49. Ржевский В.В. Открытые горные работы. – М.: Недра, 1985.
50. Ржевский В.В., Трубецкой К.Н. Перспективы развития горной науки в области открытой разработки месторождений полезных ископаемых / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 1987.
51. Ручное и подземное выщелачивание металлов / Г.Д. Лисовский [и др.]. – М.: Недра, 1982.
52. Рыжков Ю.А., Волков А.Н., Гоголин В.А. Механика и технология формирования закладочных массивов. – М.: Недра, 1985.
53. Секисов Г.В., Таскаев А.А. Раздельная выемка руд на карьерах. – Фрунзе; Илили, 1986.
54. Секисов Г.В., Юматов Б.Н., Буянов Н.И. Формирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах. – М.: Недра, 1987.
55. Слепцов М.Н., Азимов Р.Ш., Мосинец В.Н. Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов. – М.: Недра, 1986.
56. Совершенствование технологии подземной разработки маломощных рудных месторождений Кольского полуострова / И.И. Бессонов [и др.] / Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 1990.
57. Способы вскрытия, подготовки и системы разработки шахтных полей / Б.Ф. Братченко [и др.]. – М.: Недра, 1985.
58. Стариков А.В. Комплексное освоение угольных месторождений. – М.: Недра, 1990.
59. Стариков А.В., Донская Е.М., Кузнецов Г.И. Развитие техники и технологии подземной добычи угля в сложных горно-геологических условиях. – М.: ВИНТИ, 1990.
60. Стариков А.В., Корягин В.Ф. Разработка угольных пластов под охраняемыми объектами / Ин-т комплексного освоения недр. – М., 1987.
61. Технология многофронтальной отработки запасов угля выемочных блоков / Ю.Н. Кузнецов [и др.] / Моск. гос. геол. ун-т. – М., 1994.
62. Трубецкой К.Н. Комплексное освоение рудных месторождений при открытом способе разработки // Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1985.
63. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. – М.: Недра, 1993.
64. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / под ред. М.В. Курлени: в 2 ч. / Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 1996. Ч. 1–2.
65. Фугзан М.Д., Каплунов Д.Р., Пазынич В.И. Интенсивность подземной эксплуатации рудных месторождений. – М.: Наука, 1980.
66. Цыганов М.Н. Подземная разработка с высокой полнотой извлечения руд. – М.: Недра, 1985.

67. *Шубодеров В.И.* Основные направления системного подхода к обоснованию вариантов долгосрочного развития горнодобывающих предприятий // Комплексное освоение минерально-сырьевых ресурсов / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 1989.

68. *Щадов В.М.* Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 300 с.

### 4.3. Строительная геотехнология

**Строительная геотехнология – это совокупность знаний о прочности, устойчивости и долговечности подземных сооружений, методах и закономерностях освоения подземного пространства недр.**

Строительная геотехнология составляет научную базу деятельности человека по использованию участков земной коры для размещения в них разнообразных объектов жизнеобеспечения. Ее научные данные используются при проектировании, строительстве и реконструкции подземных сооружений, а также в процессе их эксплуатации для обеспечения долговременной защиты.

К основным методам освоения подземного пространства относятся:

- приспособление природных полостей (пещер, карстовых пустот);
- реконструкция, восстановление или переоборудование существующих техногенных полостей (горных выработок, отработанных шахт и рудников, каменноломен, катакомб, законсервированных объектов ГО и т.д.) для их повторного использования в новом качестве;
- строительство подземных сооружений определенного функционального назначения (горнодобывающие предприятия, тоннели, подземные ГЭС и АЭС, гаражи и т.п.).

Развитие цивилизации сопровождается дальнейшим расширением инфраструктуры и ростом народонаселения, что неизбежно ведет к сокращению неосвоенных территорий на поверхности планеты и изысканию новых мест для размещения сооружений, производственных и иных объектов человеческой деятельности. По существу, таких мест три: космос, водоемы и недра. На современном этапе развития нашего общества наибольший интерес представляет подземное пространство недр.

Во всем мире строительство объектов различного назначения под землей стало одним из приоритетных направлений. Их число в развитых странах удваивается каждые 10 лет, а в перспективе следует ожидать дальнейшего наращивания темпов освоения подземного пространства. Возможность сбережения земельных угодий, материальных, энергетических и других ресурсов, экономическая выгодность и другие преимущества выдвигают использование подземного пространства недр в число наиболее крупных и важных проблем для всех государств, в том числе и для России, несмотря на ее еще достаточно богатый природный потенциал. Реализация проблемы связана с решением очень многих

изыскательских, технических, технологических, экологических, социальных, экономических и других задач. Главные из них:

- изучение геоморфологических, литологических, тектонических, гидрогеологических, гидротермических, геодинамических, сейсмических и климатогеографических условий строительства подземного объекта в рассматриваемом горном отводе с целью выделения внутренне однородных объемов горных пород – литосферных блоков, соизмеримых с объемами размещаемых сооружений и конструкций;

- выбор способов и средств, а также параметров ведения горных работ и методов обеспечения длительного функционирования проектируемого подземного объекта;

- определение результирующих показателей строительства, эксплуатации и ликвидации (консервации) подземного сооружения.

Конкретный перечень возможных научных, практических и других задач устанавливается применительно к каждому виду планируемого объекта (шахтное, гражданское и промышленное строительство, склады, хранилища, гидроэнергетические сооружения, лечебницы, объекты науки, культуры, туризма, спорта и др.).

Закономерности, составляющие научную базу строительной геотехнологии, отражают две различные группы процессов, развивающихся в техногенно-природной системе «человек–подземное сооружение–массив горных пород»: физические и технологические (горностроительные).

Строительная геотехнология изучает взаимосвязи технологических процессов с объективными законами природы применительно к искусственно создаваемым системам в подземных условиях.

Закономерности, устанавливаемые при изучении физических и горностроительных технологических процессов, представляют собой единые в пространстве и времени комбинации. Поэтому вполне правомерно говорить об основных объективных технических закономерностях, т.е. об устойчивых, необходимых проявлениях свойств, связей материальных образований, обусловленных искусственной системой их взаимодействия, в которых реализуются строго заданные параметры материальных процессов, позволяющие создавать технические устройства, способные нести функции средств труда.

На основе знаний о механическом состоянии среды при создании подземных сооружений могут быть раскрыты закономерности, позволяющие качественно и количественно оценивать влияние свойств пород, условий и технологий строительства и дальнейшего использования подземных сооружений на формирование и развитие во времени напряженно-деформированного состояния инженерных конструкций. При этом под инженерными конструкциями понимаются не только крепи горных выработок и обделки подземных сооружений, но и окружающие их части массива горных пород, способные выполнять грузонесущие функции.

**Целью строительной геотехнологии** как науки является изучение объективных закономерностей и взаимосвязей между элементами горно-строительной технологии, качественно и количественно характеризующих эксплуатационную надежность подземных сооружений и эффективность процесса их строительства, реконструкции и восстановления, является.

**Предметом изучения строительной геотехнологии** являются: технологии строительства, конструкции подземных сооружений, взаимодействующие с массивом горных пород, методы проектирования и расчета подземных сооружений, способы и средства обеспечения их прочности, устойчивости и долговечности, способы и методы строительства, реконструкции и восстановления подземных сооружений, способы и средства механизации горно-строительных работ, способы охраны подземных сооружений от вредных природных и техногенных воздействий, методы организации и управления горно-строительными работами и их экономической эффективностью, методы и технические средства обеспечения экологической безопасности горно-строительных процессов.

**Главной задачей строительной геотехнологии** следует считать научное обоснование и разработку технических и технологических решений, обеспечивающих надежность, безопасность и эффективность их реализации при строительстве, реконструкции и восстановлении подземных сооружений и освоении подземного пространства.

#### 4.3.1. Объекты изучения строительной геотехнологии

**Объектами изучения строительной геотехнологии** являются подземные сооружения горнодобывающих предприятий и энергетических комплексов, транспортные, гидротехнические и коммунальные тоннели, тоннели метрополитена, инженерные сооружения в подземном пространстве городов и другие подземные сооружения различного назначения.

По функциональному назначению подземные объекты можно разделить на несколько важнейших групп:

- энергетические и горнопромышленные комплексы;
- промышленные предприятия, транспортные магистрали и комплексы, хранилища долгосрочного резерва, склады, гаражи, автостоянки, утилдоры и многофункциональные комплексы;
- объекты социально-бытового назначения (библиотеки, клиники и больницы, товарные базы и хранилища, музеи, водоочистные сооружения и хранилища воды, бассейны, спортзалы, магазины, киноконцертные залы, церкви, рестораны, научные центры);
- подземные объекты экологического значения (хранилища-могильники для захоронения радиоактивных и промышленных отходов, вредных веществ, опасные производства);
- подземные объекты оборонного назначения.

Растущий интерес к освоению подземного пространства в значительной мере обусловлен положительными качествами подземных сооружений. Использование подземного пространства для размещения объектов различного назначения, помимо повышения эффективности использования недр и экономии территории, позволяет существенно уменьшить затраты энергии на отопление и охлаждение помещений, резко снизить влияние внешних климатических условий на внутреннюю среду помещений и др.

При строительстве подземных сооружений сохраняются ценные земельные угодья, обеспечивается экологическая чистота поверхности и достигается экономия материальных ресурсов. Подземные объекты надежно защищены от прямого воздействия климатических факторов. Благодаря теплофизическим свойствам земного массива с глубиной резко уменьшается амплитуда температурных колебаний наружного воздуха, что обуславливает существенное снижение теплопотерь подземных сооружений, а также теплопоступления из окружающей среды. Создаваемые при этом внутренние условия весьма благоприятны для размещения в подземных горных выработках складов продовольствия, винохранилищ, сейфов, кладовых кинофотоматериалов и документов, а также производств, требующих термokonстантных условий внутренней среды.

Объекты, размещаемые в подземных горных выработках, характеризуются повышенной виброустойчивостью и акустической изоляцией по сравнению с наземными сооружениями. Эти свойства особенно благоприятны для размещения в подземном пространстве объектов, требующих полной акустической изоляции от внешней среды (станции геофизических наблюдений, студии звукозаписи, радио и телевидение, лаборатории и др.). Виброустойчивость подземных сооружений позволяет организовывать в подземных горных выработках производственные процессы, требующие полного отсутствия вибрации несущих и ограждающих конструкций.

Высокая способность породного массива защищать от внешних воздействий позволяет широко использовать подземные сооружения для укрытия людей от средств массового поражения и для защиты от катастроф и стихийных бедствий. В подземных горных выработках соляных шахт лечат хронический бронхит, астму и другие заболевания людей.

Расширение практики использования подземного пространства для различных хозяйственных целей в значительной мере связано с процессом урбанизации, защитой окружающей среды от отрицательных воздействий транспортных инженерных систем и потенциально опасных производств, а также с целью сохранения энергии и утилизации вредных отходов ряда отраслей промышленности.

Особого внимания заслуживают подземные объекты для целей водоснабжения, хранения нефти, нефтепродуктов и различных видов горючего газа.

В современных условиях перспективным является строительство подземных атомных электрических станций как одного из направлений развития

и обеспечения безопасности ядерной энергетики. С позиции охраны окружающей среды это целесообразно, а по инженерно-геологическим и геомеханическим условиям вполне осуществимо даже в массивах менее прочных, чем массивы гранитов или базальтов.

О перспективности размещения в подземном пространстве иных объектов энергетики (тепловых, гидро- и пневмоаккумулирующих электростанций) свидетельствует уже то, что такие их структурно-технологические элементы, как шлаконакопители, системы очистки и переработки газопылевых и водных отходов, гидро- и пневмоаккумуляторы можно разместить в подземном пространстве, так же как и аналогичные элементы вредных производств и объектов нефтехимической промышленности.

Бурный рост промышленности, развитие науки, создание новых технологических процессов во второй половине XX столетия привели к образованию значительного количества промышленных и бытовых отходов, высокотоксичных и радиоактивных веществ, находящихся в твердом, жидком или газообразном состоянии и требующих удаления из биосферы.

В стране ежегодно вовлекается в производство 13–15 млрд т природных ресурсов, из которых в конечную продукцию переходит от 1 до 10 %, а остальные попадают в отходы, требующие утилизации и захоронения.

В настоящее время наряду с традиционными способами удаления отходов (сжигание, разбавление поверхностными водами, захоронение и сброс в поверхностные водотоки, моря и океаны, просто свалки на поверхности) все большее распространение, в первую очередь для наиболее токсичных и радиоактивных веществ, получает способ захоронения отходов в глубокие горизонты геологических формаций путем закачки в скважины жидких и складирования в горных выработках твердых отходов. В перспективе возможно массовое применение глубинного захоронения муниципальных и слаботоксичных промышленных отходов, что обусловлено его явными преимуществами в сравнении с остальными, а именно экологичностью, малой землеемкостью горного отвода, возможностью организации могильников близ потребителя и даже в городской черте, а также использованием для захоронения выработанного пространства законсервированных или закончивших срок службы шахт, рудников и карьеров.

Подземное захоронение твердых промышленных отходов (ТПО) предусматривает создание полостей в слабопроницаемых отложениях на глубинах примерно от 30 до 1000 м и является сложной комплексной проблемой, включающей вопросы: геолого-гидрогеологического обоснования возможности подземного захоронения; специального изучения слабопроницаемых отложений (их гидродинамической и геомеханической прочности, фильтрационной и диффузионной проницаемости, изменения прочностных и фильтрационных свойств вследствие физико-химического воздействия захороняемых отходов, условия образования трещиноватости при образовании емкостей взрывным способом и др.); технологии сооружения емкостей и способов загрузки емкостей отхода-

ми; изучения взаимодействия отходов с вмещающими породами и возможного перехода токсичных соединений в окружающую среду; гидрогеологического и санитарного контроля на участках захоронения ТПО; технико-экономического обоснования захоронения отходов и др.

При решении проблемы подземного захоронения отходов возникает необходимость проведения различных исследований, сопряженных с фундаментальными науками, являющимися их частью либо представляющими самостоятельное научное направление.

Во многих странах интенсивно развиваются прогрессивные направления подземного транспортного строительства. Так, например, подземные железные дороги, подземные скоростные трамваи и метрополитены позволяют уменьшить последствия перенаселенности больших городов, высвободить площади для жилой застройки на поверхности земли и пропустить большие грузопотоки людей. Глубокие подземные тоннели инженерных систем мегаполисов могут служить для многоцелевого использования (канализации, водопровода, ливневых вод, транспорта), что позволяет на этой основе усовершенствовать современные системы жизнеобеспечения городов. В крупнейших подземных станциях по очистке сточных вод, расположенных в Стокгольме и Хельсинки, осуществляются централизованные сбор, очистка и контроль вредных выбросов, что позволяет сохранить исторические ландшафты. Дорожные тоннели на магистральных автодорогах и в городах сохраняют жилые массивы, упрощают работу транспорта и могут служить убежищами для укрытия населения в военный период.

Имеются примеры строительства подземных транспортных тоннелей под акваториями. Крупнейший из них – комплекс подземных тоннелей под проливом Ла-Манш. В перспективе планируется создание аналогичного комплекса под Беринговым проливом.

#### 4.3.2. Становление строительной геотехнологии как науки

Становление строительной геотехнологии в России относится к началу XX века и связано с созданием научных основ проектирования и строительства шахт и рудников, организацией исследований по проблемам горного дела и строительной геотехнологии в частности.

Интенсивное развитие строительной геотехнологии в основном относится к 30–40-м годам прошлого века. Этому в значительной мере способствовало внедрение механизации основных процессов горнопроходческих работ на базе электрификации горной промышленности. В этот период были начаты исследования по разработке специальных способов строительства выработок с применением сжатого воздуха, замораживания водоносных и тампонирувания трещиноватых горных пород и их реализация в практике. Разрабатывались способы бурения стволов и скважин большого диаметра.

Большое значение в этот период сыграли систематизация, анализ и обобщение производственного опыта в области проведения горных выработок обыч-

ными и специальными способами, оптимизации параметров буровзрывного комплекса, создания мобильных средств механизированной погрузки породы и тяжелых бурильных машин, а также средств проходческого водоотлива и вентиляции.

В 50–60-х гг. меняются и совершенствуются техника и технология проходческих работ. Создаются и внедряются высокопроизводительные машины и комплексы, механизующие бурение шпуров и погрузку породы при проходке стволов. Развиваются исследования процессов проходки стволов и определяются области целесообразного применения различных средств механизации. Разрабатываются рекомендации по совершенствованию технологии бурения шпуров, погрузки породы, проходческого подъема, водоотлива, вентиляции, возведения постоянной крепи, армировки и других процессов.

При строительстве горизонтальных выработок внедряются новые типы пневматических бурильных машин с механической подачей на забой, высокопроизводительные погрузочные машины различного типа, совершенствуется призабойный транспорт, организуются массовые скоростные проходки, внедряются проходческие комбайны и щитовые комплексы. Разрабатываются новые конструкции крепей и механизмов для их установки в выработке, применяются научно-обоснованные методы расчета крепи. Проводятся исследования по разработке различных типов буровых установок для бурения стволов и скважин большого диаметра. Выходят в свет фундаментальные научные труды по бурению стволов, искусственному замораживанию пород при проведении горных выработок, химическому закреплению песчаных грунтов. Разрабатывается теория процессов теплопередачи в горных породах при их замораживании.

Получают широкое развитие исследования в области тоннелестроения и метростроения. Начиная со строительства первой очереди Московского метрополитена, научные исследования были направлены на создание высокопроизводительной техники для строительства тоннелей, новых технологических процессов, прогрессивных конструкций тоннелей. Для отечественного тоннелестроения характерен массовый переход от чугунных обделок к железобетонным, обоснование и внедрение технологии щитового способа строительства тоннелей мелкого заложения и др.

Получает развитие строительство подземных гидротехнических сооружений. В состав комплексов подземных гидросооружений, располагаемых преимущественно в скальных породах, входят тоннели, шахты, камеры, конструкции которых чрезвычайно разнообразны. К специфике этих сооружений относятся и их размеры. Площадь поперечного сечения тоннелей для пропуска воды достигает  $290 \text{ м}^2$ , площадь камерных выработок для размещения в них машинных залов ГЭС превышает  $1500 \text{ м}^2$ , диаметры стволов шахт – до 30 м. Усилиями отечественных ученых разрабатываются научные основы их проектирования и способы строительства тоннелей и камер с использованием средств комплексной механизации подземных работ на базе самоходного оборудования и приме-

нения облегченных крепей, позволяющие вести проходку сплошным забоем и по элементам сечения последовательно или параллельно во времени.

Разрабатываются методы расчета параметров буровзрывных работ, вентиляции, крепления и погрузки породы в тоннелях и камерах, алгоритмы построения циклов проходческих и бетонных работ, обеспечивающие наивысшие для данных условий скорости строительства подземных сооружений.

На рубеже 50–60-х годов была построена первая в мире подземная атомная станция. В эти же годы в горнодобывающих отраслях промышленности внедряются мощные стволовые проходческие комплексы, обеспечивающие высокую механизацию проходки стволов, разрабатываются принципы автоматизации погрузки и выгрузки породы, проходческого подъема, двухступенчатого водоотлива. Отрабатывается новая технология механизации возведения монолитной бетонной крепи с применением створчатой опалубки и подачей бетона в ствол самотеком по трубам. Создаются методы оптимизации продолжительности проходческого цикла, учитывающие глубину шпуров, производительность погрузки и подъема породы, а также горно-геологические и технические условия проходки. На основе научных исследований и обобщений опыта организуются скоростные проходки вертикальных стволов, позволившие установить мировые рекорды. Продолжаются теоретические и экспериментальные исследования по созданию проходческих комбайнов и самоходного оборудования.

В этот же период значительный вклад был внесен в разработку теории разрушения горных пород при бурении, в оптимизацию режимов бурения, создание конструкций бурильных машин и бурового инструмента, средств борьбы с пылеобразованием. Разработаны теоретические основы гидродинамики промывочных растворов, проектирования бурового инструмента, режимов бурения, динамики буровых установок, регенерации промывочного раствора. Обосновывается возможность расширения области целесообразного применения способа замораживания горных пород для строительства стволов в условиях больших глубин, высоких напоров и засоленности подземных вод, температуры среды и фильтрации. Внедряется способ погружения крепи в тиксотропной рубашке при проходке стволов в сложных горно-геологических условиях.

Научные обобщения отечественного и зарубежного опыта обеспечили более высокий уровень производства работ по строительству тоннелей и подземных сооружений большего поперечного сечения. Особо следует отметить разработку и широкое применение механизированных тоннелепроходческих машин, самоходного мощного бурового оборудования. Проводятся исследования по внедрению комбайновой технологии проходки выработок в крепких породах. Внедряется высокоэффективный способ строительства тоннелей с монолитно-прессованной обделкой.

В 70–80-х годах проводятся широкие исследования по обоснованию новых прогрессивных конструкций крепей горных выработок и обделок подземных сооружений, том числе из набрызг-бетона, по разработке анкерной крепи. Форми-

руется научная и учебная дисциплина «Механика подземных сооружений». Проводятся исследования с целью создания конструкций подземных хранилищ нефти и газа и технологий их строительства. Проводятся теоретические и опытно-экспериментальные исследования по применению ядерных взрывов для создания подземных емкостей.

Обобщаются исследования по всему комплексу строительства горных выработок и подземных сооружений в различных условиях. Систематизируются теоретические исследования и производственный опыт строительства тоннелей и подземных сооружений больших размеров, в которых отражены выбор способа и технологии строительства, методы расчета основных параметров производств, процессов организации работ, метод установления области целесообразного применения высокопроизводительных машин и комплексов, научные основы автоматизированных систем проектирования организации и производства горно-строительных работ.

Большое внимание уделяется развитию и совершенствованию строительства стволов с использованием тампонирующей горных пород. Развиваются нетрадиционные способы замораживания при строительстве промышленных и городских подземных сооружений.

К настоящему времени исследованиями отечественных ученых-метростроителей были созданы и внедрены прогрессивные конструкции станций односводчатого и пилонного типов глубокого заложения с применением сборного железобетона. В метростроении эффективно используются отечественные механизированные проходческие щиты, комплексы для проходки тоннелей из цельных секций при открытом способе работ.

На базе выполненных исследований и создания конструкций машин и механизмов, схем организации работ формируются методологические основы научно-технического освоения подземного пространства. Все это позволило сформулировать понятие «освоение подземного пространства» как область научной и производственной деятельности по строительству подземных сооружений, а также использованию естественных и техногенных полостей для размещения в них различных по функциональному назначению объектов жизнеобеспечения человеческого общества.

Основопологающей идеей освоения подземного пространства является принцип использования и сохранения недр как видоизменяемого ресурса жизнеобеспечения общества. Указанный принцип предполагает, что извлечение тех или иных ресурсов недр необходимо планировать с учетом возможности создания условий для воспроизводства новых ресурсов, использование которых позволит не только компенсировать первоначальные затраты, но и получать дополнительный хозяйственный, экономический или социальный эффект.

Научное содержание проблемы освоения подземного пространства предполагает использование системных представлений о взаимосвязанности природных и техногенных процессов, динамических характеристик геологических

структур Земли, опирается на обширную информационную базу знаний об особенностях рельефа, тектоническом строении, закономерностях проявлений различных физических полей, достижениях в технологиях подземного строительства, создании оборудования для подземных объектов и, следовательно, нуждается в интеграции различных наук. Однако центральное место в системе этих наук, обеспечивающих решение проблемы освоения подземного пространства, занимает строительная геотехнология.

#### 4.3.3. Основные научные направления строительной геотехнологии

Основными научными направлениями строительной геотехнологии являются:

1. Методология создания подземных сооружений, включающая:

– исследования и обоснование целесообразности и технической возможности строительства подземных сооружений, месторасположения подземного сооружения, его форм и размеров в зависимости от функционального назначения и горно-геологических условий строительства;

– стратегию и методы освоения техногенных подземных пространств при утилизации и повторном использовании существующих подземных горных выработок и сооружений.

2. Механика подземных сооружений, содержанием которой являются:

– методы оценки устойчивости подземных сооружений; исследования процессов взаимодействия инженерных конструкций с породными массивами и влияния технологии ведения градостроительных работ на состояние внешней среды;

– обоснование новых материалов, рациональных типов и конструкций крепей и обделок;

– разработка новых методов расчета инженерных конструкций, оценка их прочности, устойчивости и долговечности.

3. Обоснование технологии строительства, реконструкции и восстановления подземных горных выработок и сооружений, включающее:

– исследования взаимосвязей элементов технологии горно-строительных работ;

– установление качественных и количественных параметров, определяющих выбор способов, техники и технологии строительства, методов организации и управления с учетом влияния природных и техногенных факторов на ее технико-экономические показатели;

– исследования и обоснование схем и способов реконструкции и восстановления подземных сооружений с целью увеличения срока их службы или повторного использования с новым функциональным назначением.

4. Управление состоянием породного массива при ведении горно-строительных работ, включающее исследования и обоснование способов и техноло-

гических параметров процессов замораживания, химического укрепления, тампонажа, водопонижения, осушения, разупрочнения пород и др.

Первый научный раздел «Строительной геотехнологии» связан с разработкой научных основ или методологии создания подземных сооружений, учения о методах, приемах и операциях проектирования этих сооружений на основе достижений науки и техники с целью рационального освоения подземного пространства.

Потребность в разработке методологии создания подземных сооружений возникла в связи с возрастающим интересом в мире к освоению подземного пространства недр Земли и необходимостью обеспечения экологической безопасности жизнедеятельности общества. К сегодняшнему дню уже обоснованы методы, принципы и подходы, применение которых обеспечивает повышение качества подземных сооружений. Это является крупным вкладом в развитие методологии проектирования подземных сооружений с целью обеспечения перспектив дальнейшего освоения подземного пространства, экологически безопасного использования недр как элемента среды выживания человека.

Освоение подземного пространства, являющееся составной частью освоения ресурсов недр Земли, осуществляется в целях извлечения полезных ископаемых и размещения различных народнохозяйственных объектов, не связанных с добычей полезных ископаемых. Освоение подземного пространства при добыче полезных ископаемых предполагает использование комплексов созданных подземных горных выработок по окончании эксплуатации месторождения или его части в промышленных и хозяйственных целях.

Освоение подземного пространства для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, предполагает специальное создание подземных сооружений для заданных целей.

Эти различия определяют особенности методологии освоения подземного пространства, создаваемого как при добыче полезных ископаемых, так и для специальных целей. Однако и в том, и в другом случае имеет место общность системы творческих приемов и методов исследований. В методологическом отношении строительная геотехнология представляет совокупность знаний о подземных сооружениях в массиве горных пород, технических, экономических и организационных взаимосвязях технологических процессов при их строительстве, реконструкции и восстановлении с природной средой, с назначением объектов. В область исследований строительной геотехнологии включается обоснование методов проектирования, способов расчета конструкции подземных сооружений, а также методов оценки их надежности и долговечности.

В недрах Земли, как в развивающейся системе, постоянно происходят фазовые переходы с выделением огромной энергии (землетрясения, обвалы, горные удары, провалы, сдвигения и т.п.). В этих условиях создание подземных сооружений осуществляется как процесс постоянной переработки информации и принятия решений, генерирования и оценки инженерных решений с учетом

особенностей строительства и эксплуатации объекта. Поэтому необходимо производить оценку возможных последствий строительства подземных сооружений и его влияния на окружающую среду и экономику региона с учетом критерия «риск – польза».

В процессе строительства подземного сооружения с использованием современных подходов и методов менеджмента создается объект как многофункциональная, интегральная техногенно-природная система, способствующая улучшению инфраструктуры и повышению качества жизни людей. Поэтому методология проектирования подземных сооружений должна также предусматривать оценку особенностей и свойств пород и участка недр для строящихся объектов с целью выбора мест их размещения, определения функций и технологических процессов, осуществляемых на подземном объекте, его архитектурных, объемно-планировочных и конструктивных решений, технологий строительства подземного сооружения.

Это необходимо для определения расчетной стоимости и сроков строительства, исследований технико-экономической целесообразности строительства подземного сооружения с учетом возможных рисков, оценки технического и экономического уровня объекта, оценки его качества и соответствия современным нормам и требованиям.

Проектирование строительства подземных сооружений должно проводиться на основе комплексного подхода к следующим взаимосвязанным проблемам: инженерно-геологической, горно-технологической, конструкционной и защиты объектов во время их эксплуатации. В этом случае представляется возможным выявить все факторы для максимально возможного использования несущих свойств породного массива, передовых технологий с учетом специфики конструкций и их последующей эксплуатации.

Таким образом, методология создания подземных сооружений по существу, является аппаратом, специально приспособленным для принятия решений при проектировании подземных сооружений и освоения подземного пространства.

Утилизация техногенных подземных пространств после окончания деятельности горнодобывающего предприятия или даже одновременно с процессом разработки месторождения является актуальной научной проблемой и важной задачей строительной геотехнологии. Она сулит немалые выгоды по целому ряду соображений:

- техническая и экономическая оценка выработанных пространств является стимулом развития предприятий горнодобывающей промышленности в том смысле, что обоснованием рентабельности малоперспективных шахт и месторождений может служить возможность коммерческого использования их выработок «в последующем»;

- обширные техногенные подземные пространства могут рассматриваться как жизненно важный ресурс в условиях дефицита территории;

– в большинстве случаев систематическое освоение пространства отработанных подземных горных выработок сулит экономический эффект как в отношении строительной стоимости объектов, так и по энергозатратам при их эксплуатации;

– целесообразной в глобальном экологическом аспекте представляется стратегия размещения вредных производств и захоронения промышленных отходов в выработанном пространстве шахт и рудников.

Второй научный раздел «Строительной геотехнологии» связан с геомеханическим разделом горных наук «Недроведение» и имеет целью обоснование технологий, реализующих способы и средства обеспечения прочности, устойчивости и долговечности инженерных конструкций горных выработок и подземных сооружений, на основе закономерностей их взаимодействия с массивом горных пород.

Для прогнозирования механического состояния породного массива, т.е. качественной и количественной оценок уровня развития и реализации процессов деформирования пород, вмещающих подземные сооружения, необходимо знать размеры и форму областей разрушения, величины смещений породного контура, характер их распределения по периметру в зависимости от параметров сооружений и способов их создания.

Обобщение опыта проведения выработок различного назначения, их размещения в массиве горных пород, выбора формы и площади сечения, а также научные исследования эффективности способов и средств проходки, надежности крепления, долговременной устойчивости выработок привели к созданию рациональных технологий подземного строительства и научно обоснованных конструкций сооружений и крепей. Установлены зависимости смещений контура выработок от глубины их заложения, прочности вмещающих пород, угла залегания, ориентации в массиве; ее размеров, влияния смежных выработок и др.

Исследование процессов взаимодействия породных массивов с конструкциями подземных сооружений пришло на смену поискам универсальной гипотезы горного давления.

Теоретические исследования взаимодействия крепи с массивом пород осуществлялись на основе решения полярно симметричных (одномерных) задач механики горных пород для различных механических моделей пород. Результатом таких исследований явились зависимости между напряжениями на контуре выработки круглого сечения (отпором крепи) и перемещениями этого контура, получившие название уравнений (диаграмм) равновесных состояний массива, ослабленного выработкой.

Доказано, что несущая способность крепи зависит от толщины прокладок, деформативных свойств забутовочного материала, характера распределения нагрузок по контуру крепи и герметических размеров блоков. Результаты этих исследований вошли в обоснование рациональных конструкций крепей и способов их возведения.

Важным результатом исследования процесса создания набрызг-бетонных обделок является эффект выравнивания нагрузок по контуру выработки. Установлены закономерности изменения контактного давления от последовательности производства проходческих работ.

Многочисленные исследования процесса взаимодействия инженерных конструкций подземных сооружений с породным массивом были направлены на установление закономерностей влияния различных горно-геологических и горно-технических факторов (рельефа местности, конструктивных особенностей крепей и обделок, температурных условий и т.п.) на формирование нагрузок.

Установлено влияние гористого рельефа на напряженно-деформированное состояние крепей горных выработок, выражающееся в нарушении симметричности поля напряжений и деформаций и искривления главных осей в расчетной области. Это, в свою очередь, приводит к дополнительной концентрации напряжений в кровле и в одной из стенок выработки, что ухудшает условия ее устойчивости в целом. С увеличением неравномерности строения рельефа и воздействия наземных сооружений указанный эффект усиливается, что вызывает необходимость предусматривать в конструкциях крепей регулировку направления максимальной сопротивляемости и податливости.

Разработаны прогрессивные конструкции крепи из армированного набрызг-бетона, способные обеспечивать эксплуатационные показатели поддержания выработок и характеризующиеся низкой металлоемкостью при высокой степени механизации ее возведения.

При строительстве и эксплуатации горных выработок и подземных сооружений в условиях значительных сезонных колебаний температуры существенное влияние на напряженно-деформированное состояние крепи могут оказывать температурные напряжения. Для уменьшения их влияния целесообразно применение монолитной крепи без прочной связи с окружающими породами. При сводчатой крепи для снижения суммарных напряжений следует изменить форму выработки, обеспечить переменную толщину крепи в своде с увеличением к пятам.

Установленные фундаментальные закономерности распределения нагрузок на конструкции тоннелей и станций метрополитена явились основой для разработки нормативных документов по проектированию тоннелей.

В основе существующих методик расчета инженерных конструкций подземных сооружений лежат известные методы механики твердого деформированного тела и строительной механики. Данные методики, основанные на одних и тех же принципах механики, отличаются, как правило, гипотезами в постановке и решении задачи. Поскольку расчет конструкций подземных сооружений сопровождается расчетом окружающего породного массива, указанные методы механики применяются как для конструкций, так и для массива, причем в разных сочетаниях в зависимости от постановки задачи и требуемой точности расчетов. Применение этих методов перспективно и в конечном счете сводится

к решению систем алгебраических уравнений, что легко может быть выполнено на современных ЭВМ. Методы механики твердого деформируемого тела имеют довольно ограниченное применение – главным образом для расчета осесимметричных кольцевых конструкций и реже – для конструкций некругового очертания.

Развитием теории и методов расчета конструкций подземных сооружений явилось обоснование принципа единства научных знаний и подходов к расчету всех видов крепи, учитывающего совместное деформирование и взаимодействие обделок подземных сооружений и вмещающего массива, что освобождает от необходимости изначального подразделения нагрузок на активные и реактивные, и позволяет определить нагрузки на крепь в процессе расчета.

Концепция взаимодействия крепи с массивом пород привела к формулировке новых методов расчета и проектирования крепи и в конечном счете – к формированию нового научного направления в строительной геомеханике – механики подземных сооружений.

В отличие от традиционных методов расчета, рассматривающих крепь (обделки) как обычные конструкции, испытывающие заданные нагрузки со стороны пород, механика подземных сооружений исследует систему «крепь–массив», рассматривая ее как единую деформируемую систему, воспринимающую внешние нагрузки и воздействия. Элементы указанной системы – крепь и окружающий породный массив – находятся в процессе нагружения в контактом взаимодействии друг с другом. Возникающие в результате этого взаимодействия нормальные и касательные напряжения на контакте крепи с массивом (нагрузки на крепь) определяются в процессе расчета крепи как промежуточный результат.

С использованием этого подхода разработаны математические модели, описывающие взаимодействие с массивом пород и напряженно-деформированное состояние различных типов, видов и конструкций крепи горных выработок и обделок тоннелей при всех основных видах нагрузок и воздействий, которые испытывает система «крепь–массив».

Разработаны методы расчета и основы технологий возведения многослойных обделок для комплексов параллельных тоннелей круглого и произвольного сечения, крепей стволов в неоднородном и неравномерно оттаивающем массиве вечно мерзлых пород и многослойной крепи в трансверсально-изотропном массиве, различных типов анкерной крепи. Разработаны методы прогнозирования осадок дневной поверхности при строительстве тоннелей и расчета обделок тоннелей мелкого заложения, позволяющие исследовать влияние нагрузок от массы здания, сооружений и транспортных средств.

Обоснование и разработка новых материалов для подземного строительства ведется в направлении повышения долговечности инженерных конструкций. Это приводит к необходимости постановки исследований кинетики комплекса процессов, протекающих при взаимодействии инженерных конструкций с массивом. Примером подобных исследований могут служить исследования меха-

низма процесса массопереноса в бетоне конструкций подземных сооружений при фильтрационном, диффузионном и капиллярном потоках агрессивных веществ и кинетики коррозионных процессов. В частности, установлены эмпирические зависимости изменения прочности бетона тоннельных конструкций, подвергающихся длительному воздействию сульфатных вод, от степени агрессивности последних.

Обводненность подземных выработок и рост гидростатических давлений потребовали создания водонепроницаемых материалов для крепления. Для нейтрализации агрессивного воздействия подземных вод на крепи и обделки созданы сульфатостойкие цементы.

Необходимость забутовки выработанных полостей и закрепного пространства потребовала создания водостойких пластичных и дешевых материалов с использованием гипсоцементно-шлаковых составов совместно с горелыми породами в качестве заполнителей.

Проблемы укрепления и тампонажа несвязных и трещиноватых горных пород привели к разработке рецептур укрепляющих составов на полимерной основе, тампонажных – на глино-цементной и цементной основах.

Третий научный раздел «Строительной геотехнологии» охватывает широкий круг задач, изучающих взаимосвязи горно-строительных процессов и их параметров, техники и технологии подземного строительства с природными факторами и функциональным назначением объектов.

Вертикальные стволы шахт, особенно глубокие (более 1500 м), представляют собой весьма ответственные горные выработки, которые относятся к сложным, трудоемким и дорогостоящим объектам высокого инженерного класса. Затраты на строительство стволов, шахт и рудников составляют от 20 до 50 % общей стоимости горно-капитальных работ, а продолжительность проходки – от 30 до 60 % от общей продолжительности строительства шахты. Естественно, что проблеме исследования технологических схем проходки вертикальных стволов шахт, выбору наиболее рациональных схем для конкретных горно-геологических условий, исследованию устойчивости пород, окружающих ствол, выбору типа крепи, взаимодействию пород с крепью ствола, т.е. исследованию вопросов строительной геомеханики, посвящен целый ряд научных работ. В этих работах рассмотрены вопросы оптимального проектирования и создания интенсивных технологий проходки вертикальных стволов, шахт и рудников с применением буровзрывного способа разрушения горных пород. Созданы системы многофакторных моделей, наиболее полно отражающих целостную картину реального многообразия производственного механизма проходки стволов. В результате многолетних комплексных исследований получены новые научные знания:

– установлены основные закономерности технологии проходческих процессов, реально отражающие современный уровень организации и механизации работ;

- получены многофакторные зависимости комплексного влияния различных горнотехнических и технологических факторов на скорость и трудоемкость проходки стволов;
- разработаны расчетно-аналитические методы интенсификации и оптимизации производственно-технологического режима проходки с учетом оценки детерминированных и вероятностных связей в совокупном их проявлении;
- установлены количественные связи новых элементов технологии БВР с применением глубоких шпуров и механизированных бурильных установок;
- определены особенности функционирования погрузочных и подъемных установок в рамках единого процесса безлюдной погрузки породы и работы без перецепки бадей;
- предложен новый подход к определению и оценке стоимостных параметров проходческих работ по системе экономического паспорта на базе обобщения элементов первичных затрат.

В результате были разработаны прогрессивные совмещенные технологические схемы проходки стволов с призабойным возведением бетонной крепи, параллельно-щитовая схема с возведением постоянной крепи, новые типы призабойных опалубок с автоматизированным отрывом от бетона и др. Все это обеспечило достижение высоких темпов проходческих работ (до 400 м/мес).

Зарубежный и отечественный опыт свидетельствует, что освоение подземного пространства все в большей степени требует применения высоких технологий, представляющих собой органический синтез фундаментальных закономерностей горно-строительных процессов, совершенных способов ведения работ, наивысшего уровня их механизации, контролируемости и возможностей управления.

Характерным примером современной высокой технологии проходки горизонтальных подземных горных выработок является строительство подводного железнодорожного перехода под проливом Ла-Манш. Протяженность каждого из трех тоннелей 50 км. Железнодорожные и вспомогательные тоннели с внутренними диаметрами соответственно 7,6 и 4,8 м прокладывали с обеих сторон. Для проходки тоннелей были использованы специально сконструированные тоннелепроходческие комплексы. На участках сооружения тоннелей в скальных и смешанных породах проходческие комплексы оборудовали системами опережающего химического укрепления пород. В благоприятных условиях при применении обделки, обжимаемой в породу, была достигнута рекордная скорость проходки – 1700 м/мес, а на участках, где применялась обычная обделка из железобетонных тубингов с болтовыми связями и гидроизоляцией швов, скорость не превышала 1200 м/мес.

Технология строительства подземных сооружений и ее организационные формы за последние десятилетия претерпели принципиальные изменения, став областью высоких технологий и деловой активности специализированных фирм.

Наиболее перспективен при проходке тоннелей новый австрийский метод (НАТМ). Присущая ему гибкость технологии в сочетании с инженерно-геологической экспертизой и систематическим контролем за изменением деформированного состояния крепи и окружающего массива создают оптимальные условия для широкого распространения НАТМ при проходке подземных горных выработок в неоднородных инженерно-геологических условиях, в том числе в закарстованных грунтах. НАТМ предусматривает использование анкеров и набрызг-бетона.

В варианте аналогичного способа проходки горных выработок, разработанном отечественными специалистами, предусматривается закрепление выработки по ее длине крепями, имеющими различную несущую способность и податливость. Таким образом, в процессе строительства выработки как бы регулируется несущая способность крепи в зависимости от изменения геомеханических условий. Способ крепления горных выработок, включающий установку первоначальной крепи и последующее ее усиление дополнительными элементами, отличается тем, что с целью обеспечения соответствия характеристик крепи свойствами массива горных пород определяют минимальные, максимальные и сигнальные смещения кровли выработки, а первоначальную (базовую) крепь устанавливают на всем ее протяжении с несущей способностью, соответствующей минимальным смещениям. Внедрение крепи регулируемого сопротивления позволяет исключить необоснованные запасы прочности крепи на участках с благоприятными горно-геологическими условиями и предотвратить ее разрушение и перекрепление в неблагоприятных условиях за счет своевременного увеличения несущей способности. Сформулированный новый подход к креплению выработок является основой для разработки гибкой ресурсосберегающей технологии в шахтном строительстве. Экспериментальное внедрение разработанного способа крепления подтвердило его эффективность.

Норвежский способ проходки тоннелей (НГМ) наиболее применим для сооружения тоннелей в крепких трещиноватых породах, разрабатываемых обычно с выемкой пород буровзрывным или комбайновым способами и креплением набрызг-бетонной крепью и анкерами.

Одним из важнейших направлений научных исследований в области совершенствования технологии строительства тоннелей является механизация горно-проходческих работ.

Ведущие фирмы мира разрабатывают новые проходческие комбайны и совершенствуют уже созданные. Так, японская фирма «Мицубиси» изготовила новый проходческий комбайн для сооружения тоннеля диаметром 8,4 м. Самый большой в мире роторный проходческий щит изготовлен также японской фирмой «Кавасаки даюкоге». Его наружный диаметр 13,98 м, длина 11,8 м, мощность привода 1080 кВт. Самый большой в мире проходческий арочный щит для проходки тоннелей сечением 150 м<sup>2</sup> изготовлен в Италии.

Расширяется область применения стреловых комбайнов избирательного действия, имеющих навесное оборудование для бурения шпуров и установки анкеров и металлической арочной крепи. При использовании комбайнов избирательного действия в тоннелестроении средняя скорость проходки составляет 150 м/мес и более.

На проходке перегонных и станционных тоннелей метрополитенов в России применяются проходческие комбайны со стреловидным органом. Их внедрение обусловило коренное изменение технологии проходки и крепления выработок, применение многооборотной инвентарной и металлической арочной крепи и, что особенно важно, позволило отказаться от буровзрывного способа работ в условиях городской застройки.

Строительство метрополитенов в самых различных гидрогеологических условиях, и в первую очередь в неустойчивых и мягких горных породах, осуществляется во все более увеличивающихся масштабах с помощью проходческих щитов различных типов. В частности, реализована технология, при которой порода в призабойной камере щита, отделенной герметичной перегородкой и заполненной грунтовым или тиксотропным раствором, разрабатывается гидромеханизированным способом или механизированным исполнительным органом, превращается в пульпу и удаляется по трубе.

Особенно эффективным оказалось применение механизированных щитов в сочетании с обделками, обжимаемыми в породу. На строительстве Санкт-Петербургского метрополитена в сухих протерозойских глинах были достигнуты устойчивые скорости проходки тоннеля щитовым комплексом до 300 м/мес, а рекордная скорость сооружения составила 1253 м/мес.

Сооружение камер большого сечения требует решения двух взаимосвязанных проблем: обеспечение устойчивости массива пород вокруг камер и эффективность разработки внутрикамерного объема. Для решения первой проблемы разработан ряд конструктивных и технологических решений, к которым относится предварительное укрепление скального массива при сооружении подземных камер большой площади сечения, предназначенное, в частности, для проходки камер пролетом 50–60 м и высотой 60–80 м в зонах значительных тектонических нарушений и сейсмических районах.

Для строительства вертикальных камер цилиндрической формы предложен способ, в котором для создания защитного пояса используется спиральный тоннель, проводимый по периферии камеры. Размеры породных целиков между спиралями тоннеля должны обеспечивать их устойчивость. Из спирального тоннеля крепят контур камеры предварительно напряженными анкерами. Тем самым еще до начала разработки вокруг камеры создается защитный пояс из породы, укрепленной анкерами, воспринимающий деформации горного массива при строительстве камеры. При недостаточно прочных породах для этой цели модно применять инъекционное упрочнение массива различными способами.

Примером может служить сооружение универсальной камеры в горе Ховдетoppen в г. Цевин (Норвегия) для спортивной арены «Евик Олимпик» к зимним Олимпийским играм 1994 года. Эта камера является одной из крупнейших в мире, сооруженной в скальных породах: ширина ее 62 м, длина 91 м, высота 25 м. Арена рассчитана на 5400 зрителей. Проходку камеры вели буровзрывным способом с первоначальным проведением двух подходных тоннелей поперечным сечением 20 и 45 м<sup>2</sup>. Затем из первого тоннеля прошли верхнюю центральную штольню вдоль всей длины будущего зала, в которой установили измерительное оборудование для контроля за развитием деформаций пород и осадками в процессе проходки. После завершения проходки центральной верхней штольни начали разработку пород в прилегающих к ней боковых выработках. Таким образом, пролет на этой стадии работ составил 32 м. Одновременно с проходкой верхних боковых выработок возводили постоянное крепление свода. Параллельно с работами в сводовой части зала вели проходку основного подходного тоннеля к подошве камеры и двух наклонных от него к выработкам в пятах свода. На заключительной стадии работ по созданию свода будущего зала разрабатывали породу между ними и верхними боковыми выработками. По завершении этих работ возводили постоянное крепление свода и затем разрабатывали нижнюю часть сечения камеры традиционным уступным способом (максимальная высота уступа 12 м), после чего наносили сталефибробрызг-бетон и устанавливали напряженные анкеры. При выполнении работ систематически проводили измерения деформаций и контролировали состояние поверхности свода и стен.

Применение новых ядерно-взрывных способов строительной геотехнологии в горной промышленности является результатом фундаментальных исследований эффектов воздействия подземных камуфлетных ядерных взрывов на горные породы. При их помощи сооружены подземные емкости больших объемов для хранения природного газа и подземного захоронения промышленных высокотоксичных отходов.

Научно-технической основой взрывных строительных технологий являются физические законы взрывных процессов под землей, описывающие механическое и сейсмическое действия взрыва, распространение ударных волн. При этом важно обеспечить безопасность при взрыве, особенно радиационную. Моделирование крупномасштабных взрывов при различных параметрах волновых полей, связанных с энергией взрыва и свойствами горных пород, применялось для исследования основных направлений эффектов воздействия взрывов ядерно-радиационных эффектов электромагнитных, термодинамических и волновых. В результате были получены эмпирические формулы для определения радиуса полости и высоты столба обрушения, характер изменения трещиноватости с расстоянием, определена проницаемость непосредственно в массиве горных пород (в зоне трещиноватости). В зависимости от мощности заряда, глубины его размещения и свойств горного массива выделены семь характерных зон (гидроди-

намическая, зона вытеснения пород, смятия, дробления, интенсивной трещиноватости, блоковой трещиноватости, упругих деформаций) и определены их размеры в зависимости от радиуса полости  $R$ : зона смятия или интенсивного расширения пород и минералов равна  $(1,2+1,6) \times R$ , зона дробления пород –  $(2,5+3) \times R$  в сводной части; зона интенсивной трещиноватости – до  $6 \times R$ ; блоковой трещиноватости –  $(7,8+8) \times R$ ; зона упругих деформаций достигает  $10 \times R$ .

На основе теоретических и экспериментальных исследований создана методика расчета сейсмического действия подземных ядерных взрывов, определяющего выбор места заложения заряда, его мощность и границы зоны сейсмической безопасности.

Для создания подземных емкостей в калийных солях с помощью мощных ядерных камуфлетных взрывов разработаны теоретические основы создания устойчивых, сухих и герметичных подземных емкостей, методика, описывающая развитие подземной полости во времени, инженерные методы определения размеров полости, размеров зон откольных явлений и герметизирующих толщ.

Эти исследования послужили основой для создания принципов конструирования скважин для спуска ядерных зарядов, производства взрыва, технологий и способов безопасного вскрытия и технологической эксплуатации емкостей, методов расчета отдельных узлов скважины, методы мониторинга за состоянием среды во время взрыва, вскрытия полости и во время эксплуатации.

По разработанным технологиям с применением подземных ядерных взрывов было сооружено 23 емкости суммарным объемом более  $850\,000\text{ м}^3$ .

Наша страна обладает приоритетом создания первой в мире подземной атомной станции (ПАС), построенной в конце 50-х годов. Установки и оборудование станции расположены в подземных камерах с пролетами 16–20 м, высотой – до 60 м, длиной – до 300 м. Ширина междукамерных целиков машинного зала 40 м (2 пролета камер). Камеры имеют железобетонную обделку, включающую пилоны, своды и стены арочной конструкции с горизонтальным распором.

В результате многолетних научно-исследовательских работ, сопровождавших эксплуатацию подземных атомных сооружений (ПАС), получены зависимости: развития горного давления в массиве горных пород от повышенных температур действующих ядерно-энергетических установок; изменения температуры вмещающих пород на контурах подземных сооружений большого сечения (реакторных камер, камер теплообменников, машинного зала, вентиляционных залов и др.); напряженно-деформированного состояния железобетонных обделок стен камер и распорных ригелей от совместного воздействия горного давления и повышенных температур.

На этой основе разработаны методы и средства системы регламентных измерений, специальных исследований и контроля состояния подземных сооружений с учетом влияния горного давления, геологического строения, физико-механических свойств вмещающих горных пород, их влажности, температуры

вмещающих пород, обделки и внутренних железобетонных конструкций, воздуха в камерах, радиационного воздействия на материалы, времени работы сооружений. Все это послужило созданию научно-технических основ прогнозирования устойчивости и надежности подземных сооружений и концепции подземного радиационно безопасного, экологически чистого размещения и эксплуатации отработавших блоков и захоронения ПАС в различных горно-геологических условиях. В соответствии с требованиями МАГАТЭ о многобарьерности системы изоляции и защиты ПАС и могильников радиационно-активных отходов сформулированы основные требования к выбору участка строительства таких объектов, выбору поперечных сечений камерных выработок и технологии их сооружения. Доказано, что ПАС можно сооружать даже в подземном пространстве мегаполисов.

Планомерное освоение подземного пространства крупных городов поставило перед учеными и производственниками задачу обоснования способов и схем технологии реконструкции и восстановления подземных сооружений с целью увеличения срока их службы или повторного использования с новым функциональным назначением. Важное место в решении этой сложной задачи занимает диагностика инженерных конструкций подземных сооружений, работающих в различных горно-геологических условиях и состояниях окружающей среды. Основу общего подхода к оценке состояния конструкций подземных сооружений составляют закономерности изменения качества строительных материалов и конструкций во времени при их взаимодействии с окружающей средой. Установлены основополагающие качественные взаимосвязи состояния окружающей среды и долговечности бетона и железобетона, однако для их практического использования в условиях подземного строительства необходимо накопление статистических данных о наработке конструкций на отказ с целью планирования сроков и стоимости выполнения ремонтных работ.

Четвертый научный раздел «Строительной геотехнологии» связан с обоснованием и разработкой специальных способов и технологий управления состоянием породного массива при ведении горно-строительных работ.

Научные исследования в области управления состоянием массива при способах строительства подземных сооружений начали развиваться с середины 30-х годов по мере освоения месторождений полезных ископаемых в неблагоприятных гидрогеологических условиях и с началом строительства подземных сооружений в крупных городах.

К специальным способам строительства подземных сооружений относятся способы искусственного замораживания и химического упрочнения пород, тампонирующее, водопонижение, способ «стена в грунте» и др.

Для обоснования основных технологических параметров специальных способов строительства и методов управления состоянием массива необходимо знание закономерностей поведения пород и изменения их свойств при различных воздействиях на них.

В период становления способа замораживания, когда работы велись на незначительных глубинах от поверхности земли, развитие теории искусственного замораживания велось из предпосылки, что вокруг каждой замораживающей колонки в течение всего периода времени формируется ледогрунтовое ограждение цилиндрической формы. Исходя из этого была разработана теория, не учитывающая взаимовлияние смежных замораживающих колонок, и обоснованы основные параметры технологии замораживания, удовлетворявшие нуждам практики до перехода на глубины замораживания более 100 м и на низкотемпературные режимы.

Более поздними исследованиями было установлено влияние на режим замораживания расстояния между скважинами и роль смыкания ледопородных тел, формирующихся вокруг колонок. После смыкания ледопородных тел в замкнутое ограждение происходит интенсивное выравнивание общего фронта промерзания вокруг всех колонок, в этот период скорость формирования ледопородного ограждения в замковой плоскости в 4–5 раз выше, чем в начальный. Описанные закономерности формирования ледопородных ограждений справедливы для условий отсутствия движения подземных вод, т.е. фильтрации.

Исследования в этой области показали, что в условиях фильтрации формирование ледопородного ограждения вокруг каждой колонки принципиально отличается от вышеописанного. Ледогрунтовые тела вокруг колонок имеют вид эллипса и эксцентриситета, значение которого зависит от температуры подземных вод и скорости фильтрации. По мере увеличения ледопородных тел скорость в щели смыкания увеличивается, и при определенных условиях наступает предельно-равновесное состояние, т.е. прекращается рост ледопородного ограждения. Для таких случаев разработаны технические и технологические решения по формированию ледопородных ограждений.

В последние годы создан принципиально новый способ замораживания с применением твердых криоагентов, использование которого раскрывает новые возможности по внедрению в практику подземного строительства ресурсосберегающих технологий замораживания.

Для проведения горных выработок при значительных притоках воды во многих случаях предусматриваются технологии с применением тампонирования пород.

На основании многочисленных исследований структурно-механических и геологических свойств возможных тампонажных растворов и эффективности их применения установлено, что наиболее приемлемым для борьбы с водопритоками при строительстве шахт являются растворы, в которых содержание вяжущего по массе составляет 8–13 %. Это означает, что тампонажный раствор должен, с одной стороны, обладать максимально высокими структурно-механическими свойствами, а с другой – удовлетворительно прокачиваться насосом. Таким требованиям удовлетворяют глиноцементные растворы.

Результаты исследований в этой области легли в основу разработки и широкого внедрения в практику подземного строительства методологии выбора составов тампонажных растворов с учетом геологических условий месторождения или подземного объекта. На базе выполненных за последние годы комплексных исследований обоснованы и разработаны новые специальные способы, такие как «стена в грунте», вакуумное водопонижение и др.

Строительная геотехнология, как составная часть комплекса горных наук, связана с широким кругом естественных, общетехнических и социально-экономических наук. В своем развитии она опирается на знания физики, химии, математики, геологии, теплотехники и термодинамики, экономической теории, социологии и др. Кроме того, ее специфические особенности обуславливают связь со строительной механикой, инженерной геологией, материаловедением, охраной труда, экологией и правом.

**Основные направления научных исследований в области строительной геотехнологии:**

– формирование государственной концепции освоения подземного пространства для размещения объектов различного народнохозяйственного назначения с учетом рационального использования ресурсов недр и охраны окружающей среды;

– разработка методов проектирования и строительства крупных многопрофильных предприятий с малоотходными, ресурсосберегающими и экологически безопасными геотехнологиями, обеспечивающих комплексное освоение и сохранение ресурсов недр, возможность использования созданного выработанного пространства;

– инженерные и геомеханические основы технологий строительства, реконструкции и восстановления подземных сооружений при освоении подземного пространства;

– исследования гидродинамических, тепловых и аэродинамических процессов в системе «подземное сооружение–массив горных пород» при создании и эксплуатации подземных объектов;

– разработка методов обеспечения устойчивости подземных горных выработок и методов ее контроля, а также критериев допустимых естественных и техногенных воздействий на массы горных пород;

– разработка технологий подземного захоронения и хранения различных категорий отходов и общих принципов выбора оптимальных вариантов объемно-планировочных, конструктивных решений и компоновочных систем подземных хранилищ с учетом структурно-тектонических и геодинамических условий;

– создание способов и методов контроля состояния отходов в процессе их утилизации и хранения, в том числе с использованием системы долговременных наблюдений.

### Список литературы к разделу 4.3

1. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1992.
2. *Баклашов И.В., Борисов В.Н., Куликов Ю.Н.* Проектирование и строительство горно-технических зданий и сооружений. – М.: Недра, 1991.
3. *Бульчев Н.С.* Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994.
4. *Ваучский Н.П.* Использование подземного пространства для вечного захоронения радиоактивных отходов // Подземное и шахтное строительство. – 1992. – № 2. – С. 2–4.
5. *Голицынский Д.М., Маренный Я.И.* Набрызг-бетон в транспортном строительстве. – М.: Транспорт, 1993.
6. *Демешко Е.Н.* Щитовая проходка тоннелей в водонасыщенных неустойчивых грунтах // Подземное пространство мира. – 1994. – № 1–2. – С. 23–26.
7. *Дядькин Ю.Д.* Проблемы комплексного освоения ресурсов недр и использования подземного пространства // Горный журнал. – 1990. – № 7. – С. 54–57.
8. *Котенко Е.А.* Создание подземных атомных станций. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1996.
9. *Котенко Е.А.* Ядерные энергокомплексы подземного пространства // Горный журнал. – 1995. – № 9. – С. 34–40.
10. *Красноштейн А.Е., Папулов Л.М., Фрайнбург Г.З.* Освоение подземного пространства калийных рудников // Подземное и шахтное строительство. – 1993. – № 1–2. – С. 3–7.
11. *Мазуров В.А.* Подземные газонефтехранилища в отложениях каменной соли. – М.: Недра, 1982.
12. *Макаров О.Н., Меркин В.Е.* Транспортные тоннели и метрополитены. Техника и технология строительства: состояние и перспективы. – М.: ТИМР, 1991.
13. *Марков Г.А., Чесноков С.А., Бабаянц Г.М.* Проблемы использования выработанного пространства рудников для размещения гидротехнических объектов // Подземное и шахтное строительство. – 1993. – № 1–2. – С. 5–9.
14. *Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А.* Подземные атомные станции. – Апатиты: Изд-во ГоИ КНЦ РАН, 1991.
15. *Мильман П.Е., Эдельштейн М.Г.* Подземные агропромышленные комплексы // Подземное и шахтное строительство. – 1992. – № 5–6. – С. 14–16.
16. *Петренко Е.В.* Повторное использование выработанного пространства в народнохозяйственных целях // Подземное и шахтное строительство. – 1993. – № 1–2. – С. 5–7.
17. *Петренко Е.В., Петренко И.Е.* Закономерности освоения подземного пространства // Подземное пространство мира. – 1995. – № 3–4. – С. 69–74.

18. Печеркин И.А., Андрейчук В.Н. Использование естественных полостей недр // Подземное и шахтное строительство. – 1993. – № 1–2. – С. 10–14.
19. Храпов В.Г., Демешко Е.А., Наумов С.Н. Тоннели и метрополитены. – М.: Транспорт, 1989.
20. Швецов П.Ф., Зильберборд А.Ф., Папернов М.М. Подземное пространство и его освоение. – М.: Наука, 1992.
21. Шемякин Е.И. Основные направления и перспективы использования подземного пространства // Подземное и шахтное строительство. – 1993. – № 1–2. – С. 15–16.
22. Шемякин Е.И. Проблемы освоения подземного пространства//Шахтное строительство. – 1991. – № 1. – С. 3–4.
23. Шахтное и подземное строительство: учебник: в 2 т. / Б.А. Картозия [и др.]. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – Т. 1. – 732 с.; Т. 2. – 815 с.
24. Картозия Б.А., Борисов В.Н. Инженерные задачи механики подземных сооружений: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 246 с.
25. Картозия Б.А., Корчак А.В., Мельников С.А. Строительная геотехнология: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – 231 с.
26. Куликова Е.Ю., Корчак А.В., Левченко А.Н. Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 223 с.
27. Панкратенко А.Н. Технология строительства выработок большого поперечного сечения. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002. – 271 с.
28. Рудяк М.С. Рациональное использование городского подземного пространства для гражданских объектов. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – 235 с.
29. Харченко А.В. Использование подземного пространства большого города для размещения транспортной инфраструктуры. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 210 с.

#### 4.4. Геотехника

**Геотехника (горное машиноведение) – наука, обеспечивающая исследованиями разработку, проектирование и создание машин и оборудования для освоения и сохранения недр, извлечения из недр, со дна водоемов, из морской воды и переработки полезных ископаемых.**

С позиций горной науки геотехнику следует рассматривать как совокупность знаний о процессах и закономерностях взаимодействия машин с горными породами при их разрушении, транспортировании, первичной переработке, а также в системах связи технологических и техногенно-природных процессов с кинематическими, динамическими и энергетическими параметрами горных машин.

Термин «геотехника» принят в классификации горных наук вместо ранее употреблявшегося «горные машины». Это обусловлено расширением геотехно-

логического пространства при комплексном освоении недр Земли. Горные технологии усложнились в связи с увеличением глубины разработки полезных ископаемых, повлекшим за собой ухудшение природных условий осваиваемых месторождений. Значимым фактором является вовлечение в разработку бедных по концентрации полезных ископаемых, ископаемых с большим содержанием вредных примесей, труднообогатимых руд и углей. Это требует создания более совершенной горной техники, способной справиться с возрастающими трудностями в добыче и переработке полезных ископаемых.

Горная наука «Геотехника» охватывает все пространство, связанное с исследованием средств комплексной механизации добычи, переработки и транспортировки всех видов минерального сырья, строительства подземных объектов.

Естественно, что новое название горной науки «Геотехника» не исключает использования выражения «горные машины», под которым понимается общее название всевозможного горного оборудования, эксплуатируемого в горнодобывающей промышленности.

Наряду с традиционными требованиями к технологиям и машинам (повышение производительности, снижение массы оборудования и др.) все в большей мере возрастают экологические требования к горному производству. Критерий экологичности становится одним из важнейших среди всех ограничений развития горнодобывающей промышленности. Экологические ограничения диктуют высокие требования к техническому уровню горной промышленности, что может быть обеспечено соответствующими геотехнологиями и высокоразвитой геотехникой.

Специфика геотехники как горной науки состоит в том, что, с одной стороны, она представляет собой самостоятельное направление, а с другой – является составной частью общего машиноведения, объединяющего комплекс знаний по теории рабочих процессов, созданию и эксплуатации горных машин. В процессе становления геотехники произошла дифференциация ее разделов, что связано с созданием машин с учетом их взаимодействия с обрабатываемой средой или с учетом технологической нагрузки. Одновременно использовались достижения в смежных областях знаний.

Геотехника, как и другие науки, связанные с исследованиями различных машин в любой другой отрасли, пользуется результатами научных исследований в машиноведении и входящих в этот комплекс наук общей теории машин и механизмов, материаловедения, теории надежности, анализа и синтеза механизмов, динамики машин, теории машин-автоматов и др. Но в геотехнике при исследовании и проектировании горных машин учитывается специфика конкретных горных условий (горное давление, напряженное состояние горного массива и прочностные характеристики пород и полезных ископаемых, газоносность, температурные перепады, влажность, запыленность и т.д.), которые накладывают свои, присущие только им ограничения.

Геотехника содержит две неотделимые друг от друга части. Первая – связана с исследованием, конструированием и созданием горных машин и механизмов по заданным технологическим требованиям. При этом, как и в общем машиностроении, используются вышеперечисленные дисциплины, относящиеся к машиноведению. Вторая часть в большей степени связана с обоснованием параметров и исследованием горных машин непосредственно на стадии совместного их рассмотрения с горно-технологическими процессами и во взаимодействии со средой. Здесь в основном используются методы технико-экономического анализа, эксперименты в лабораторных и натуральных условиях.

Горное производство – отрасль, характеризующаяся специфическими условиями функционирования, выражающимися в том, что залегание полезных ископаемых и свойства массива пород имеют весьма сложный и нестационарный характер. Многофункциональны взаимосвязи производственных процессов. Все это ограничивает получение достаточно точных математических зависимостей между условиями залегания полезных ископаемых и элементами изучаемой системы, включающей в себя геотехнологию и геотехнику. Поэтому можно считать, что термин «геотехника» является обобщающим по отношению к ранее существовавшему «горные машины» из-за широкой разветвленности и разнообразия охватываемых этим термином физических процессов, выполняемых в горнодобывающей промышленности различного рода машинами.

Геотехника предназначена для решения множества разнообразных задач, находящихся в сложных взаимосвязях, описывающих взаимодействие различных горных машин с массивом и средой при выполнении технологических процессов разработки месторождений полезных ископаемых. Исследования в этом разделе горных наук проводят с целью обоснования конструирования (проектирования), эксплуатации и ремонта горных машин, комплексов, агрегатов и другого горного оборудования, предназначенного для подземной, открытой и скважинной добычи полезных ископаемых, их обогащения и строительства подземных и наземных горных объектов.

Помимо изложенного выше содержанием геотехники как науки являются методы исследования, проектирования и эксплуатации горных машин.

**Предметом науки «Геотехника» являются:** физико-механическая сущность взаимодействия исполнительных органов машин со средой в процессе разрушения и перемещения горных пород при различных воздействиях; связи в геотехнических и геотехнологических системах; кинематика и динамика работы горных машин; рабочие режимы, конструктивные и эксплуатационные параметры горных машин и комплексов; теория проектирования, создания и эксплуатации машин.

**Структура и основные направления научных исследований в геотехнике:**

– закономерности взаимодействия исполнительных органов машин и комплексов с горными породами; закономерности рабочих процессов горных ма-

шин, методы расчета рабочих процессов и систем машин (агрегатов, комплексов), оптимизация параметров машин и режимов их работы;

– взаимосвязь параметров, принципиальных и конструктивных схем машин (агрегатов, комплексов) с горнотехническими условиями;

– научные основы создания средств комплексной механизации и автоматизации производственных процессов с применением систем горных машин и оборудования; прогнозирование развития систем горных машин и оборудования; научные основы и технические решения для роботизированных горных машин; уровни качества и надежности горных машин (агрегатов, комплексов), оборудования, их элементов;

– разработка методов и средств контроля качества и надежности; методы испытаний горных машин; особенности технологии изготовления горных машин и оборудования с учетом специфики работы горных предприятий; проблемы системы «человек – машина – окружающая среда» с учетом особенностей технологий горного производства, экологических факторов.

Для геотехники ближайшими смежными горными науками являются недроведение и геотехнология. Кроме результатов такой науки, как машиноведение, геотехника использует основные положения механики деформируемого твердого тела, сыпучего тела и грунтов, а также основные положения информатики и автоматизации, теории управления и регулирования электропривода.

#### 4.4.1. Становление геотехники как горной науки

Машинное производство, возникшее в XVIII веке, было подготовлено результатами научно-технических разработок математиков, механиков, физиков и других специалистов.

Геотехника как наука органически связана с технологическими процессами, и для определения ее места общей структуре горных наук необходимо проанализировать взаимосвязь техники с технологией и определить вопросы теории, относящейся к горной науке – геотехнике.

Такой анализ указывает на постоянную связь между технологией и техникой, что подтверждает их одинаковые основания на самостоятельность в науке.

Создание геотехники непосредственно связано с разработкой новых технологий. Любая технология для своей реализации требует технических средств. Либо новая технология обуславливает возникновение новой техники, либо новая техника рождает определенные технологические процессы. Главное в том, что техника и технология непрерывно связаны между собой. Именно из-за непосредственной связи машин с технологическими процессами горного производства, выполняемыми этой техникой, геотехника отнесена к разделу горных наук «Геотехнология».

Геотехника развивалась как знания, обосновывающие пути и методы создания техники для разработки месторождений полезных ископаемых и переработки минерального сырья, и сформировалась в России как научная дисциплина

в конце XVIII века в Петербургском горном училище. Дальнейшее развитие она получила при создании теоретических основ рудничных стационарных машин, а затем машин для выемки, погрузки и транспортирования пород и полезных ископаемых. основополагающая роль в становлении науки «Геотехника» принадлежит академику А.М. Терпигореву, организовавшему в Московском горном институте кафедру горных машин и написавшему в 1934 году первый учебник по горным машинам.

Можно выделить следующие периоды развития современной отечественной геотехники как самостоятельной горной науки.

В период осуществления механизации горных работ на базе электрификации карьеров, шахт и рудников (1920–1950 гг.) проводили систематические исследования по определению параметров горных машин и механизмов. Были начаты исследования физико-механических свойств углей, горных пород и руд, процессов разрушения угля и горных пород, динамики и надежности горных машин. Началось становление дисциплин, связанных с созданием горных машин с учетом специфических требований к ним: искро- и взрывобезопасности, пожаробезопасности, защиты от обрушения пород, запыленности, внезапных выбросов угля и газа, температурных и атмосферных влияний и др. Развивались исследования по созданию приводов горных машин (электрических, гидравлических и пневматических).

В период 1950–1970 годов в рамках геотехники формировались самостоятельные направления по созданию: очистных и проходческих комплексов и агрегатов для подземных работ; экскавационных машин и выемочных комплексов для открытых горных работ; буровых машин и установок для глубокого бурения, включая морское; горно-транспортных машин; выемочно-транспортирующих машин (бульдозеров, скреперов и др.); оборудования для гидромеханизации и гидротранспорта; машин для дробления и измельчения полезных ископаемых и горных пород; машин для обогащения полезных ископаемых; режущего и бурового инструмента для горных машин; средств пылеподавления и др.

В этот же период под влиянием развития геотехники и ее задач сформировались отдельные научные дисциплины, изучающие:

свойства горных пород и массива как разрушаемых и поддерживаемых сред; механическое и комбинированное разрушение углей, горных пород и грунтов; динамику и надежность горных машин;

теории транспортирования сыпучих и кусковых материалов, дробления и измельчения полезных ископаемых и горных пород;

теории электро- и гидромеханического привода, регулирования и автоматического управления режимами работы горных машин.

Последующий период 1970–90-х годов характеризуется в первую очередь изучением процессов и закономерностей взаимодействия рабочих органов машин с полезными ископаемыми и горными породами при их добыче (отделение от массива, транспортирование и первичная переработка).

Важные составляющие геотехники – разработка на основе установленных закономерностей этих процессов рациональных параметров машин, разработка способов расчета нагруженности их элементов и определения производительности и качественных показателей работы машин, их диагностики в конкретных условиях эксплуатации.

Для современного уровня геотехники характерным является разработка обобщенных математических моделей соответствующих процессов взаимодействия, позволяющих решать указанные выше задачи с учетом многих влияющих факторов.

#### 4.4.2. Содержание геотехники как науки и важнейшие результаты исследований

Важное место в геотехнике как науке, призванной обеспечивать эффективное и управляемое техногенное преобразование недр, занимают научные исследования в области механического разрушения углей и горных пород. Подобные исследования должны обеспечивать разработку методов расчета горных машин и в первую очередь их рабочих (исполнительных) органов. Конечной целью таких исследований является эффективное осуществление рабочих процессов отделения угля и горных пород от массива с выгрузкой продуктов разрушения из зоны отбойки, перемещающейся в пространстве.

**Предметами исследований геотехники являются:** угольные пласты и горные породы как разрушаемые среды; закономерности процессов резания углей и разрушения горных пород инструментами; параметры режущих инструментов и научные основы обеспечения их надежности; схемы резания и расстановки инструментов; эффективные способы разрушения массива исполнительными органами машин; параметры и режимы работы исполнительных органов машин.

Существенным методическим вопросом является выбор теоретической модели для описания процессов разрушения угля и горных пород. В определенные периоды исследований этот вопрос являлся дискуссионным, однако в конечном счете было установлено, что процесс разрушения углей и пород начинается с проявления первого признака нарушения сплошности, поэтому для его описания больше подходят энергетические методы, в том числе методы теории дробления. В связи с этим могут быть отмечены следующие общие методические положения:

- свойства разрушаемой среды должны изучаться в совокупности с выявленными закономерностями процесса разрушения, а оценку свойств среды следует производить при помощи критериев, инвариантных к режимным параметрам и масштабам разрушения;
- нагрузки на режущий инструмент и исполнительный орган машины в силу неоднородности разрушаемого массива должны рассматриваться как случайные, и для их исследования целесообразно использовать методы вероятностей и случайных процессов;

– устанавливаемые зависимости и методы расчета параметров и нагруженности исполнительных органов должны базироваться на экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне измерения режимных параметров, поскольку они должны обеспечивать точность, необходимую в инженерных расчетах;

– обобщенным критерием эффективности процесса разрушения считаются удельные энергозатраты, поскольку они определяют интенсивность разрушения горной породы, ее гранулометрический состав (сортность) и пылеобразование, а частными критериями эффективности процесса разрушения могут быть характеристики разрушаемости, отражающие область применения машин, надежность инструментов, исполнительных органов и т.д.

Работа выемочных машин и проходческих комбайнов осуществляется в условиях стохастически меняющихся внешних воздействий, обусловленных изменением свойств разрушаемых пластов и пород в пространстве и режущей способности инструментов – во времени. В силу этого разрушение угля и пород исполнительным органом может рассматриваться как случайный процесс, на который одновременно влияет совокупность факторов, характеризующих, с одной стороны, угольный пласт или породный забой как объект разрушения, который можно задать статистическими показателями, а с другой – результаты процесса разрушения (производительность, сортность, энергоемкость, удельный расход инструментов и т.д.). При расчете параметров процесса разрушения показатели этой группы выступают в качестве целевых функций или технологических и экономических ограничений.

К управляющим факторам относятся технические возможности машин: регулируемые параметры (мощность привода, показатели прочности элементов машин, их устойчивости), рассчитываемые при конструировании и не изменяемые в процессе работы; регулируемые воздействия (скорости подачи и резания, типы и число резцов в линиях резания, ширина заходки и т.д.), которые могут изменяться в процессе работы или при подготовке к ней. Задача оптимизации процесса разрушения сводится к нахождению законов изменения регулируемых воздействий, обеспечивающих получение лучших выходных параметров.

Процесс разрушения всегда сопровождается случайными возмущающими воздействиями, приводящими к возникновению экстремальных ситуаций, которые должны учитываться как в разрабатываемых моделях, так и в конструкциях путем введения соответствующих защит.

Такая многофакторная схема позволяет отдельно и в совокупности анализировать все связи, присущие процессу разрушения, рассчитывать нагрузки, производить выбор параметров и показателей режима работы машин. В результате ее применения были установлены общие закономерности разрушения пород и углей и взаимосвязи показателей процесса с параметрами горных машин, которые реализованы в нормативно-технической документации, используемой при конструировании. Для конструирования очистных и проходческих угольных

комбайнов, стругов и агрегатов был разработан комплекс отраслевых стандартов и методических документов.

Интенсивное развитие геотехники в области буровых, погрузочных и транспортных работ во второй половине текущего столетия связано с ростом потребностей в минеральном сырье и с необходимостью увеличивать объемы добычи полезных ископаемых открытым способом. В этот период усилия исследований были направлены на создание высокопроизводительной техники циклического и непрерывного действия, обеспечивающей переработку больших объемов рыхлой и скальной горной массы на крупных карьерах.

Основными научно-техническими достижениями в области бурения взрывных скважин на карьерах явились следующие: создание научных основ шарошечного бурения скважин и обоснование рациональных режимов бурения различных горных пород, разработка на этой основе параметров и конструкций станков.

Проводили теоретические и экспериментальные исследования пневмоударного и гидроударного бурения, в результате которых научно обосновали пути повышения эффективности буровых работ и создания рациональных конструкций пневмоударников и буровых коронок. Проведен большой объем поисковых, теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ по исследованию и испытанию опытных образцов станков, основанных на использовании новых, нетрадиционных методов разрушения горных пород: термического бурения (огневое и плазменное), виброударного, взрывного бурения и др. Исследования показали, что при некоторых способах производительность бурения повышается в 10 раз и более, однако при современном техническом уровне не могут быть решены вопросы безопасности и экологии. Поэтому на карьерах практическое применение, но в ограниченных масштабах (для очень крепких кварцсодержащих пород), нашло только огневое бурение и расширение скважин.

Важнейшими направлениями дальнейших исследований в области буровой техники являются:

- исследование механизма и закономерностей разрушения горных пород с различными физико-механическими свойствами при вращательном, ударно-вращательном и других, в том числе комбинированных, способах бурения в целях создания нового поколения буровой техники, энергосберегающего, износостойкого и экономичного бурового инструмента и средств удаления продуктов разрушения скважин;
- исследование процесса направленного бурения глубоких наклонных скважин и разработка рекомендаций по созданию высокопроизводительных буровых станков для заоткоски уступов;
- изыскание нетрадиционных средств и методов бурения горных пород, научное обоснование путей создания безопасной и экологически чистой техники, основанной на использовании новых и комбинированных способов разрушения пород.

Значительный объем теоретических и прикладных исследований, сопровождавших в 50–60-е гг. применение железнодорожного транспорта на отечественных карьерах, интенсивное развитие его основных технических средств послужили основой того, что железнодорожный транспорт до настоящего времени является одним из основных видов технологического транспорта на железнодорожных и угольных карьерах, а также на ряде карьеров по добыче руд цветных металлов, промстройматериалов. В черной металлургии и угольной промышленности он продолжает занимать ведущее место в перевозках горной массы, обеспечивая высокую экономичность транспортного процесса в различных климатических зонах и горнотехнических условиях. Доля железнодорожного транспорта в общих объемах перевозок горной массы колеблется в пределах 40–50 %.

Проведенные исследования по изучению динамики горнотехнических условий карьеров, а также созданию новых видов горного и транспортного оборудования обусловили широкое применение многотранспортных схем на карьерах, в том числе с использованием железнодорожного. Для сложных транспортных схем с параллельным и комбинированным использованием нескольких видов транспорта на железорудных карьерах превышает 50 %. Исследование условий эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта обусловили переход на специализированное оборудование, приспособленное для работы в специфических условиях карьеров. Это в первую очередь относится к тяговым средствам, оборудованию для путевых работ и ремонта подвижного состава, средствам электроснабжения и др.

За последние 15–20 лет на карьерном железнодорожном транспорте на базе проведенных теоретических исследований осуществлено значительное техническое переоснащение, связанное с переходом на новые прогрессивные виды тяги, с вводом в эксплуатацию мощных локомотивов, вагонов-самосвалов грузоподъемностью 145–180 т, укладкой тяжелых типов рельсов Р65 и Р75, железобетонных шпал, а также с совершенствованием технологических схем и организации работы. Электрификация карьерного транспорта позволила повысить в 2–3 раза полезную массу поездов и снизить в 1,5–2 раза себестоимость транспортирования. Результатом развития электрификации явилось внедрение системы переменного тока напряжением 10 кВ и постоянного тока напряжением 3 кВ, а также тяговых агрегатов сцепной массой 360 т, что до настоящего времени является лучшим достижением в мировой практике.

Доказательства целесообразности увеличения мощности подвижного состава, массы локомотивов, вагонов и поездов, повышение нагрузок от оси на рельсы, интенсивности движения поездов на основных направлениях грузопотоков явились теоретической основой общего усиления железнодорожного пути.

Обладая значительными технологическими преимуществами перед другими видами карьерного транспорта, автомобильный транспорт получил, начиная с 60-х годов, бурное развитие на карьерах благодаря, во-первых, развитию оте-

чественного автомобилестроения (БелАЗ), а во-вторых, – всестороннему научному обоснованию целесообразности его применения на карьерах. К середине 80-х годов грузоподъемность автосамосвалов достигала 120–180 т, т.е. приблизилась к оптимуму, и дальнейшие исследования были связаны с решением технологических, ресурсосберегающих и экологических проблем применения автомобильного транспорта в глубоких карьерах.

Научный поиск путей снижения негативного воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду в технологическом плане связан с изысканием схем вскрытия глубоких карьеров, при которых может существенно сократиться высота подъема горной массы автосамосвалами, а в конструктивном – с применением принципиально новых типов двигателей вместо дизельных. Наиболее перспективным является применение электрической тяги и различного рода накопителей энергии. Задача ученых в этом направлении состоит в исследовании взаимодействия новых технических средств с другими машинами и устройствами в карьерах, в обосновании технологических схем транспортирования в комбинации с другими видами транспорта, рациональных параметров карьерных автодорог и т.д.

Исследовано перспективное направление развития погрузочно-транспортной техники на карьерах с применением одноковшовых погрузчиков в различных климатических и горнотехнических условиях и оптимизированы процессы подготовки, черпания, погрузки и транспортирования пород. Обоснованы рациональные технологические схемы и определена область их эффективного использования.

Проведены исследования по обоснованию и созданию новых видов контейнерного оборудования: многоприводных конвейеров с приводами фрикционного типа; крутонаклонных ленточных и пластинчатых конвейеров; конвейерных лент с прокладками из высокомодульных синтетических волокон и пр. Разработано и создано вспомогательное оборудование для механизации обслуживания конвейеров.

В области создания оборудования для ЦПТ дальнейшие исследования должны быть направлены на теоретическое обоснование комплектов мобильной техники в открытом исполнении и повышение его технического уровня и эксплуатационной надежности, создание передвижных дробильно-перегрузочных установок в блочном исполнении, эффективных средств крутонаклонного непрерывного подъема и конвейеров для транспортирования крупнокусовой скальной горной массы, отвалообразователей для скальных пород и роботизированного вспомогательного оборудования для обслуживания комплексов ЦПТ и др.

В целом развитие геотехники применительно к открытой добыче полезных ископаемых шло по направлению обоснования горных и транспортных систем с увеличенной единичной мощностью (экскаваторов и средств карьерного транспорта). При разработке мягких вскрышных пород и углей наибольшее

применение получила поточная технология. Крупным достижением явилось создание и применение циклично-поточной технологии с дробильными установками и конвейерами для выемки скальной горной массы. Применение карьерных погрузчиков различных модификаций открыло новое направление в физико-технической открытой геотехнологии.

Дальнейшее совершенствование механизации открытых горных работ связано с созданием гидрофицированных шарошечных станков с диаметром бурения скважин от 125 до 400 мм, а также станков для наклонного бурения. Для решения ряда геотехнических задач необходимо создание мобильной буровой техники.

Приоритетным направлением в развитии выемочно-погрузочных машин является применение одноковшовых гидравлических экскаваторов повышенной надежности. Перед экскаваторостроением стоит также задача создания крупных шагающих драглайнов, в том числе с удлиненными стрелами.

В развитии конструкции карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности необходимо увеличение их ресурса и моторесурса двигателей. Совершенствование железнодорожного карьерного транспорта связано с разработкой тяговых агрегатов и большегрузных думпкаров нового технического уровня. Следует также отметить актуальность исследований в области создания карьерного оборудования в северном исполнении.

Состояние механизации горных работ на подземных рудниках характеризуется переходом от переносного оборудования к самоходному, увеличением единичной мощности машин, повышением автономности работы и расширением области функционального применения оборудования, его унификацией, внедрением дистанционного и программного управления машинами.

Перспективным направлением развития геотехники применительно к подземной разработке рудных месторождений является создание модульно-блочного оборудования из унификационных узлов, обеспечивающего широкую номенклатуру машин, максимально приспособленных к конкретным разнообразным условиям эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Перспективно создание самоходных установок с гидроперфораторами для бурения шпуров и скважин малого диаметра, а также станков для пневмоударного и шарошечного бурения скважин 100–250 мм. Ведется разработка систем программного управления буровыми станками с помощью мини-ЭВМ. Основными направлениями совершенствования погрузочно-транспортного оборудования является оптимизация кинематических, динамических и силовых параметров машин, а также переход от дизельного к электрическому приводу. При этом перспективно развитие оборудования с троллейно-кабельным питанием.

Эффективным направлением создания вспомогательного оборудования для подземных рудников является использование модульного принципа конструирования машин при отделяемом транспортном средстве.

Дальнейшее развитие горной промышленности с созданием уникальных карьеров, реконструкция и техническое переоснащение крупных рудников, шахт и обогатительных фабрик, средних и малых по мощности карьеров в различных регионах страны и отраслях выдвигают перед горным машиноведением новые научные проблемы и задачи.

**Приоритетные направления исследований в области геотехники:**

- изучение взаимодействия рабочих органов машин с горными породами;
- установление закономерностей рабочих процессов горных машин, разработка методов их расчета и систем машин (агрегатов, комплексов), оптимизация параметров горных машин и режимов их работы;
- разработка научных основ создания средств механизации и автоматизации процессов добычи и переработки полезных ископаемых с применением систем машин и оборудования для различных горно-геологических условий; изучение систем «человек – машина – окружающая среда» с учетом особенностей технологии горного и обогатительного производства и природно-климатических условий работы этих систем.

**Список литературы к разделу 4.4**

1. *Красников Ю.Д., Солод СВ., Топорков А.А.* Повышение надежности функционирования очистных забоев. – М.: Недра, 1993.
2. Крепление и управление кровлей в комплексно-механизированных очистных забоях / *А.А. Орлов [и др.]*. – М.: Недра, 1993.
3. *Левин В. И.* Развитие механизации проходческих и очистных работ на подземных рудниках / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 1989.
4. *Липовой А.И.* Ковшовые погрузочно-транспортные машины на подземных рудниках. – М.: Недра, 1988.
5. *Логов А.Б., Герике Б.Л., Раскин А.В.* Механическое разрушение крепких горных пород. – Новосибирск, Наука, 1989.
6. *Мельников Н.Н., Невалин Д.Г., Скобелев Л.Р.* Технология применения и параметры карьерных гидравлических экскаваторов / под ред. Н.Н. Мельникова / Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 1992.
7. *Мышляев Б. К.* Состояние и направления развития комплексной механизации очистных работ на пологих пластах угольных шахт СССР. – М.: ЦНИЭИуголь, 1990.
8. *Подэрни Р.Ю.* Механическое оборудование карьеров: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – 606 с.
9. *Шешко Е.Е.* Горно-транспортные машины и оборудование для открытых работ: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2003. – 260 с.
10. *Клорикьян С.Х.* Машины и оборудование для шахт и рудников: справочник. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2002. – 471 с.

11. *Дмитриев В.Г., Егоров П.Н., Малахов В.А.* Основы автоматизации проектирования горных транспортных машин: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 233 с.

12. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / *В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, И.В. Запенин и др.* – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 543 с.

13. *Тон В.В.* Основы научных исследований и испытаний машин и оборудования природообустройства. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 121 с.

14. *Гришко А.П., Шелоганов В.И.* Стационарные машины и установки: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 328 с.

15. *Зайков В.И., Берлявский Г.П.* Эксплуатация горных машин и оборудования: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2001. – 257 с.

16. *Старков Л.А., Земсков А.Н., Кондрашев П.И.* Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 522 с.

## 5. ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

### 5.1. Основы методологии обогащения полезных ископаемых

**Обогащение полезных ископаемых** – комплекс наук (технологическая минералогия; дезинтеграция и подготовка минерального сырья к обогащению; физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов; физические и химические процессы, извлечение полезных компонентов из природных и техногенных вод) об извлечении ценных компонентов из минерального сырья, предметом которых является изучение основных закономерностей физических, физико-химических и химических процессов разделения и концентрации минералов природного и техногенного происхождения, взаимосвязи структурного, вещественного и фазового составов минерального сырья с его технологическими свойствами. Выявленные закономерности являются основой технологий и технических средств для извлечения ценных компонентов из минерального сырья и превращения их в продукты; пригодные для последующего использования в различных отраслях промышленности.

Основные разделительные процессы осуществляются без изменения агрегатно-фазового состояния, химического состава, кристаллохимической структуры компонентов полезного ископаемого. Отдельные химические методы (термические, пиро- и гидрометаллургические) могут быть включены в технологию разделения минералов с целью повышения контрастности свойств разделяемых компонентов или доведения до нужных кондиций качества готовых продуктов. Методы обогатительного разделения, в свою очередь, могут быть включены в металлургическую технологию.

Несмотря на то что различные методы разделения минералов имеют ряд общих положений и в последнее время тяготеют к взаимопроникновению, их теоретические основы базируются на научных законах, относящихся к разным областям знаний: гравитационные методы разделения – на законах гидро- и аэродинамики, флотационное разделение – на законах физической химии, магнитные и электрические методы – на законах физики, радиометрические – на законах ядерной физики и радиохимии. Неотъемлемой частью теории флотационного разделения минералов является учение о флотационных реагентах, в основе которого законы неорганической, органической и координационной химии.

Общими для всех обогатительных процессов являются законы массопереноса, теория разделения, а также закономерности физико-химической механики.

В бывшем СССР обогащение полезных ископаемых стало развиваться как специализированная отрасль производства в первые годы советской власти, а особенно бурно в послевоенный период. Практически все руды цветной и большая часть руд черной металлургии, горно-химическое сырье, уголь, руды редких и благородных металлов подвергаются обогащению. Обогатительный передел в значительной степени определяет эффективность работы горно-перерабатывающей отрасли. За последние десятилетия были достигнуты значи-

тельные успехи в создании новой техники и технологии обогащения руд различного вещественного состава. Судя по материалам международных конгрессов, посвященных обогащению полезных ископаемых, уровень научно-технических разработок в бывшем СССР не уступал мировому, а в области создания дробильно-измельчительного оборудования предложенные МНТК «Механобр» конструкции конусно-инерционных дробилок не имеют аналогов. Из 186 видов основного дробильно-размольного и технологического оборудования 5 % имеют показатели выше мирового уровня, 75 % соответствуют ему и 20 % нуждаются в модернизации. Однако физический износ эксплуатируемого оборудования из-за недостаточных его поставок достигает 50–70 %.

В области рудоподготовки разработаны научные основы и отработаны (практически для всех видов минерального сырья) технологические режимы радиометрической сортировки и сепарации, позволяющие уже на первой стадии, до измельчения, вывести из процесса 30–40 % горной массы, используемой в качестве строительного материала. В этом направлении наша страна имеет приоритет, и основная задача заключается в создании и серийном выпуске высокопроизводительных радиометрических сепараторов.

Гравитационные методы обогащения получили широкое развитие после проведения ряда фундаментальных работ, рассматривающих с позиций классической механики процессы отсадки, концентрации на столах и винтовых сепараторах. В последние годы эффективное использование гравитационных методов для тонких частиц (менее 0,2 мм) стало возможным благодаря применению в аппаратах комбинированных воздействий – наложения центробежных, магнитных и электрических полей на минеральные суспензии. Можно ожидать, что в перспективе эти аппараты вытеснят традиционное гравитационное оборудование для обогащения материала крупностью  $(20 \pm 0,1)$  мм, так как позволяют более чем на порядок увеличить производительность на единицу площади и имеют близкую к идеальной эффективность разделения.

В 50–60-е годы были разработаны научные основы электрических методов обогащения, что позволило создать высокопроизводительные лабораторные и промышленные аппараты на основе коронного, трибоадгезионного и электростатического разделения.

Основное достижение в области магнитного обогащения – создание высокопроизводительных аппаратов с высокой напряженностью поля, предназначенных для сухого и мокрого обогащения слабомагнитных тонкоизмельченных материалов и обеспечивающих комплексное использование железных руд и редкометалльного сырья. Налажен выпуск отечественных сепараторов, не уступающих лучшим зарубежным образцам.

Первые значительные исследования формирования процесса флотации были проведены в 50-е годы. Полученные к этому времени достижения физики и химии позволили сформулировать наиболее важные закономерности флотации. Наибольшие заслуги в этой области принадлежат советскому ученому

И.Н. Плаксину, автору трудов по гидрометаллургии и флотации, основателю целой школы данного научного направления. В трудах И.Н. Плаксина разработаны теоретические основы взаимодействия флотационных реагентов с поверхностью минералов с точки зрения физико-химических процессов поверхностных явлений, физики твердого тела и теории проводимости. Это позволило обосновать стадийность и селективность действия кислорода на поверхность минералов и роль окислительно-восстановительных явлений в процессе флотации, а в дальнейшем разработать научные основы и методы промышленного использования электрохимических и радиационных воздействий для управления процессами флотации и гидрометаллургии. Ведущая роль советских ученых в разработке теории флотации неоднократно подчеркивалась на ряде международных конгрессов. В практическом плане необходимо отметить создание высокопроизводительных флотационных машин для разделения крупных частиц и шламов (> 40 мкм), разработку высокоэффективных реагентов направленного действия, технологических режимов разделения минералов со сходными флотационными свойствами. Однако следует подчеркнуть, что номенклатура используемых реагентов в три раза меньше применяемых в зарубежной практике.

В последние 10–15 лет наиболее крупные успехи достигнуты в области комбинирования процессов обогащения полезных ископаемых с пиро- и гидрометаллургическими процессами, обеспечивающими вовлечение в переработку бедных, труднообогатимых руд сложного вещественного состава. Во всех случаях применения комбинированных процессов возрастают объемы извлечения ценных компонентов на 5–10 %, наблюдается комплексное использование минерального сырья и сокращаются отходы производства.

Анализ развития техники и технологии обогащения полезных ископаемых за последние 50 лет указывает на значительные достижения отечественной фундаментальной науки в области познания основных явлений и закономерностей разделения минеральных комплексов, что позволило создать высокоэффективные методы и технологии первичной переработки руд сложного вещественного состава и обеспечить металлургическую промышленность концентратами необходимой номенклатуры и требуемого качества.

В то же время по сравнению с развитыми зарубежными государствами до сих пор наблюдается отставание в развитии отечественной машиностроительной базы для производства основного и вспомогательного обогатительного оборудования, что негативно сказывается на его технико-экономических показателях (невысокое качество, повышенные теплоемкость, энергоемкость и износостойкость). Аналогичное отставание наблюдается и в техническом оснащении научных исследований. Отсутствие специализированного производства флотационных реагентов, сорбентов экстрагентов привело не только к дефициту последних на обогатительных фабриках и вынужденным закупкам их по импорту, но и к повышению загрязненности технологических вод органикой из-за замены реагентов направленного назначения отходами нефтехимической промышлен-

ности. Вследствие недостаточной автоматизации и компьютеризации процессов обогащения полезных ископаемых производительность труда на отечественных обогатительных фабриках в 3–5 раз ниже мирового уровня, а удельные показатели (расход материальных ресурсов на 1 т перерабатываемой руды) существенно превышают аналогичные мировые показатели: расход электроэнергии – на 30 %, флотационных реагентов – в 2–3 раза, металла, изнашивающегося в футеровках, измельчающих телах и транспортных узлах – в 2,5 раза.

Кроме того, из-за ведомственной принадлежности горно-обогатительных предприятий комплексное сырье перерабатывалось только с учетом необходимой потребности отрасли в конкретном металле, что приводило к нерациональному использованию природных ресурсов и увеличению затрат на складирование отходов. В настоящее время накоплено более 12 млрд т отходов, содержание ценных компонентов в которых в ряде случаев превышает их содержание в природных месторождениях.

Помимо вышеперечисленных негативных тенденций, начиная с 90-х годов резко обострилась экологическая обстановка на горно-обогатительных предприятиях (в ряде регионов возникла угроза существованию не только биологической среде, но и человеку), наметилось прогрессирующее снижение добычи угля, руд цветных и черных металлов, горно-химического сырья, ухудшение качества перерабатываемых руд и, как следствие, вовлечение в переработку высокозольных и сернистых углей и труднообогатимых руд сложного вещественного состава, характеризующихся низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью и близкими технологическими свойствами минералов.

За последние 20 лет содержание цветных металлов в рудах снизилось в 1,3–1,5 раза, железа в 1,25 раза, золота в 1,2 раза, а доля труднообогатимых руд и угля возросла с 15 до 40 % общей массы сырья, поступающего на обогащение. Вещественный состав таких руд характеризуется тонкозернистой структурой, сложной текстурой, а иногда и субмикроскопическими формами взаимосвязи слагающих минералов, что не позволяет достаточно эффективно раскрыть их с помощью механических методов дробления и измельчения из состояния срастания; сходством технологических свойств минералов.

После распада СССР Россия утратила промышленные месторождения марганца, хрома, каолина и некоторых других элементов. Часть разведанных запасов данных типов руд относится также к категории труднообогатимых, требующих детальной разведки и разработки принципиально новых технологий. Кроме того, в связи с вступлением России в мировой рынок резко повышаются требования к качеству концентратов как по технологическим, так и экологическим нормативам. Следовательно, в настоящий момент возник ряд неразрешенных противоречий между изменением характера минерально-сырьевой базы (т.е. необходимостью вовлечения в переработку труднообогатимых руд и техногенных месторождений), экологически обостренной ситуацией в горнопромышленных

регионах и состоянием техники, технологии и организации первичной переработки минерального сырья.

В этих условиях задачи повышения полноты и комплексности обогащения полезных ископаемых, создания высокоэффективных, экологически безопасных технологий приобретают первостепенное значение, а решение их должно основываться на интенсификации действующих и создании новых процессов извлечения компонентов из труднообогатимых руд и техногенных месторождений на базе новейших достижений фундаментальных наук, комбинировании обогатительных и химико-металлургических процессов с применением современных пиро- и гидрометаллургических технологий.

## **5.2. Современная стратегия развития процессов первичной переработки минерального и техногенного сырья**

Переход на новую стратегию первичной переработки возможен только на основе новой технолого-минералогической оценки месторождений. В настоящее время технологическая минералогия имеет в своем арсенале ряд современных прецизионных методов физического и физико-химического анализа вещества, а при соответствующем уровне компьютеризации и наличии программного обеспечения возможна также экспрессная достоверная информация не только о химическом и минеральном составе полезного ископаемого, но и о технологических свойствах минеральных ассоциаций. Первые исследования золотосодержащих руд, карбонатных марганцевых руд и высокосернистых углей путем анализа изображений указывают на перспективность и эффективность данного метода, обеспечивающего возможность прогноза обогатимости сырья, особую актуальность его для оценки технологических свойств минеральных комплексов техногенных месторождений. Технологическая минералогия должна стать информационным фундаментом единого теоретического подхода к процессам первичной переработки минерального и техногенного сырья.

**Первое направление исследований:** создание программно-аппаратного комплекса, проведение экспрессной технолого-минералогической оценки природных и техногенных месторождений на основе имидж-анализа и создание научно-обоснованной технологии комплексной переработки руд и углей, в том числе для высокосернистых углей России, труднообогатимых карбонатных марганцевых руд Усинского, Порнокского и Пороженского месторождений, золотосодержащих упорных руд россыпных и техногенных месторождений.

Наличие технолого-минералогической информации позволит отойти от принципа разработки месторождения как источника моноруды. Более целесообразно для этой цели в схеме первичной обработки развить передел рудоподготовки как комплекс операций по обработке кусковой горной массы с целью превращения ее в один или несколько технологических типов кондиционной руды для последующего обогащения или использования в качестве товарного продукта.

Изучение обогатимости руд цветных, черных и редких металлов, горнохимического сырья показало, что радиометрической сепарацией можно удалить от 20 до 50 % отвального продукта, который может быть использован в качестве строительного материала, в 1,3–1,9 раза повысить содержание ценных компонентов, поступающих на обогащение, в 1,2–1,5 раза снизить количество отходов и вовлечь в переработку забалансовые руды.

Анализ основных потерь в процессах первичной переработки свидетельствует, что 35–40 % потерь обусловлено наличием сростков и 30–35 % – наличием тонких частиц менее 40 мкм. Для того чтобы снизить эти потери при переработке тонковкрапленных руд без образования сростков и одновременно без излишнего переизмельчения, традиционные процессы неселективного дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены процессом селективной дезинтеграции.

**Второе направление исследований:** разработка общей теории интергранулярного разрушения горных пород, механических и энергетических методов интенсификации разупрочнения минеральных комплексов и создание новых технологий радиометрического обогащения труднообогатимых руд.

Внедрение методов селективной дезинтеграции и радиометрической сепарации позволит снизить в 1,5–2,5 раза энергозатраты на процессы измельчения, повысить производительность фабрик в 1,5–1,9 раза и показатель извлечения ценных компонентов на 3–10 %, снизить техногенную нагрузку на окружающую среду.

Перечисленные выше факторы принципиально важны для повышения эффективности обогатительных процессов, достигших на данном этапе пределов своих возможностей. Поскольку обогащение предусматривает разделение минералов без изменения их фазового и химического состава, современные обогатительные методы непригодны для переработки руд с субмикрозернистой структурой.

Основным противоречием современного состояния сырьевой базы и традиционной технологии первичной переработки является необходимость вовлечения в эксплуатацию руд, углей и техногенных месторождений, содержащих минеральные агрегаты, которые невозможно раскрыть на минеральные фазы, а следовательно, невозможно и обогатить. Кардинальное решение этого противоречия – переработка данных типов руд в условиях горнометаллургических комбинатов, когда в цикле обогащения в концентраты извлекают только легкообогатимую часть ценных минералов, а нераскрытые минеральные агрегаты (в виде промежуточного продукта) направляют в металлургический цикл. Степень концентрирования минерального сырья при первичной обработке, после которой целесообразна его передача на металлургическую переработку, необходимо определять для каждого конкретного месторождения с учетом особенностей минерального состава и структуры руды. Оптимальное качество концентрата, при котором дальнейшее обогащение неэффективно, а в ряде случаев бес-

смысленно, нужно определять расчетным путем, начиная с момента добычи руды до момента получения металла (конечной продукции). Для месторождений с субзернистым сростанием рудных минералов нецелесообразно осуществлять селекцию, гораздо выгоднее передавать на металлургический передел коллективные концентраты и промпродукты. Пиро- и гидрометаллургические процессы, обеспечивающие переработку бедного сырья, позволят получать по комбинированной обогатительно-металлургической технологии металлы или химические соединения при высоком сквозном извлечении компонентов и максимальной комплексности использования сырья.

**Третье направление исследований:** создание новых высокоэффективных, экологически безопасных процессов комплексной переработки и вскрытия труднообогатимых руд и техногенных месторождений на основе комбинирования современных методов обогащения, пиро- и гидрометаллургии с использованием дополнительных энергетических воздействий. В том числе:

создание новых процессов первичной переработки труднообогатимых руд и сырья из техногенных образований (в первую очередь упорных золотосодержащих, оловосодержащих и полиметаллических руд) на основе комбинирования эффективных методов обогащения с пиро- и гидрометаллургическими процессами;

– разработка высокоэффективных методов раскрытия упорных руд и техногенных образований, их переработки в процессе кучного выщелачивания;

– разработка высокоэффективной технологии переработки фосфорсодержащих, карбонатных марганцевых руд (Иркутская область, Мордовия, Урал) для частичной компенсации дефицита марганца в России;

– разработка технологии глубокого обогащения угля с получением концентрата зольностью менее 2 % и содержанием серы менее 1 % для использования конечного продукта в водоугольных суспензиях, а также с целью охраны окружающей среды при сжигании угля в ТЭЦ;

– разработка технологии снижения вредных примесей (сера, фосфор) в железных концентратах с целью оздоровления экологической обстановки на металлургических предприятиях и обеспечения возможности экспорта концентратов;

– внедрение электрохимических методов водоподготовки промышленных и шахтных вод горно-металлургических предприятий, обеспечивающих охрану окружающей среды и повышение технологических показателей в условиях замкнутого водооборота;

– создание и внедрение новых процессов и аппаратов для избирательного изменения технологических свойств минералов на основе энергетических воздействий с целью значительного (1,3–1,8 раз) снижения энергозатрат на измельчение и вовлечения в переработку руд сложного вещественного состава;

– создание модульных передвижных обогатительных комплексов производительностью от 10 до 400 т/сут для переработки сырья малых и техногенных месторождений.

Главное направление развития фундаментальных знаний в области первичной переработки минерального и техногенного сырья состоит в изучении взаимосвязи структурного, вещественного и фазового составов природного и техногенного сырья с физическими, физико-химическими и технологическими свойствами минералов, сочетании методов физико-химического моделирования процессов разделения минералов с экспериментальными исследованиями основных процессов обогащения, создании теории интегранулярного разрушения минеральных комплексов и механизма интенсивного раскрытия упорных руд и техногенных образований.

Сложность и многоплановость проблемы требует прежде всего объединения сил организаций РАН, вузов и отраслевых институтов, связанных с проблематикой минерального сырья, для проведения фундаментальных исследований, соответствующая программа которых должна быть, разработана Научным советом по проблемам обогащения полезных ископаемых РАН. Реализация программы позволит к 2010 году повысить показатель извлечения металлов на 10–15 %, получить высококачественный угольный концентрат, вовлечь в переработку забалансовые руды и техногенное сырье, восполнить дефицит по марганцу, снизить энергоемкость и повысить производительность труда в 2–3 раза, резко улучшить экологическую обстановку в горнопромышленных регионах.

### 5.3. Технологическая минералогия

**Технологическая минералогия – наука, изучающая строение и физико-химические свойства минеральных агрегатов с целью эффективного использования минералов и содержащихся в них полезных компонентов.**

**Предмет исследования технологической минералогии** – руды как совокупности минералов, углубленное изучение структуры и свойств которых позволяет совершенствовать процессы их разделения и извлечения ценных компонентов физическими, химическими, биологическими и другими методами, комплексного использования минерального сырья и решения экологических проблем при добыче и переработке.

Становление технологической минералогии как самостоятельного научного направления связано прежде всего с именами Н.М. Федоровского и И.Н. Плаксина, обосновавших комплексный подход к изучению важнейших для народного хозяйства видов минерального сырья и необходимость углубления минералогических знаний о составе руд в связи с совершенствованием процессов обогащения и химической переработки. При этом И.Н. Плаксиным особо выделена обогатительная минералогия как наиболее актуальная часть технологической минералогии. Прогресс технологической минералогии обусловлен интенсивным развитием физики и химии минералов. Примечательно, что акад. А.В.Сидоренко именно физику минералов назвал «проводником научно-технического прогресса» в науке о полезных ископаемых.

Технологическая минералогия развивается по двум направлениям: стереологическому и физико-химическому. Первое – включает в себя теоретические и практические исследования раскрытия минералов при измельчении, в том числе с помощью анализа изображений. Стереологическое направление является ведущим в технологической минералогии. Подавляющая масса полезных минералов приходится на сrostки, и наиболее эффективным методом их высвобождения считается не повышение степени измельчения материала, а классификация сrostков по крупности и доизмельчение только крупных классов. Стереологические исследования природных структурных характеристик руд, а также минеральных агрегатов (сrostков) и раскрытых фаз во всех циклах переработки дают глубокую информацию о технологических свойствах руд и работе оборудования, позволяют планировать, направлять и совершенствовать процесс рудоподготовки и переработки. В международной практике пока не существует единого методологического подхода к проведению стереологических исследований. Второе направление – фазовые химико-минералогические исследования руд и продуктов их переработки с помощью широкого круга методов: оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового, термического, микронзондовых анализов, а также Оже-спектроскопии и инфракрасной спектроскопии (ИКС) для поверхностных соединений.

В исследовательскую и аналитическую практику многих минералогических и технологических лабораторий прочно вошли новые методы исследований: рентгенография, ИК-спектроскопия, дифференциально-термический анализ, радиочастотная (ЭПР, ЯМР, ЯКР), электронная и мессбауэровская спектроскопии, электронография, люминесцентные, электро- и магнитостатические анализы и др. Следует также отметить благотворное влияние на развитие технологической минералогии таких направлений, как техническая минералогия и петрография, экспериментальная минералогия со всеми ее подразделениями, технологическая минераграфия и ряд других дисциплин. Исследованиями был охвачен широкий спектр объектов: от сульфидов до углей, от железных и редкометалльных руд до алмазов, от бокситов до глин. В результате появились первые публикации, раскрывающие зависимость обогатимости от геолого-минералогических факторов железных руд, сульфидов и ряда других видов полезных ископаемых.

В различных по профилю институтах страны (ИГД им. А.А. Скочинского, Механобр, ВИМС, Гиредмет, Иргиредмет, ЦНИГРИ, Уралмеханобр, Механобрчермет и др.) были выполнены пионерные работы по изучению физических и химических свойств минералов в функциональной зависимости от их реальной структуры, по исследованию поведения минералов в технологических процессах, а также работы по проектированию технологий комплексного использования руд, усовершенствованию методов геолого-технологического картирования.

Значительный вклад в формирование технологической минералогии и внедрение ее методов в процессы переработки руд внесли такие известные геологи

и технологи, как И.Т. Александрова, Л.А. Барский, В.З. Блисковский, А.С. Вершинин, А.И. Гинзбург, В.А. Глембоцкий, Л.А. Грекулова, В.М. Изойтко, О.П. Иванов, Г.А. Митенков, П.Е. Остапенко, Б.И. Пирогов, В.И. Ревнивцев, Г.А. Сидоренко, П.М. Соложенкин, Н.Ф. Челищев, В.А. Чантурия, С.Ф. Чернопятов, А.С. Черняк, И.В. Шманенков, Л.К. Яхонтова и многие другие ученые. Итогом этого периода развития следует считать выход в свет крупных публикаций по технологической минералогии важнейших видов руд (редкометалльных, вольфрамовых, железных, оловянных, никелевых, фосфоритовых и др.), а также по обобщению данных технологической минералогии применительно к сепарационным процессам.

Следует подчеркнуть, что технологическая минералогия сегодняшнего дня использует методы кристаллохимии, кристаллографии, петрографии, физики и химии твердого тела и других наук. Из дисциплины, информирующей обогатителей о минеральном и химическом составе руд, технологическая минералогия превратилась в науку, способную в «творческом соавторстве» с техническими науками решать крупные задачи, определяющие прогресс в извлечении минералов и комплексном использовании сырья. В этом большая заслуга ученых-обогатителей, которые, познав определенные закономерности влияния структурно-химических особенностей минералов на их физические и химические свойства, поставили перед минералогами и технологами новые задачи по направленному изменению характеристик и свойств минеральных ассоциаций для повышения селективности дезинтеграции и сепарации.

Месторождения со сравнительно легкой обогатимостью полезных ископаемых во многом исчерпаны, и перед учеными-обогатителями стоят задачи исключительной сложности – разработка научных основ и технологических решений сепарации минералов и извлечения отдельных элементов из бедных, труднообогатимых и упорных руд, а также из техногенного сырья.

Содержание основных разделов и направлений технологической минералогии может быть представлено следующим образом:

- изучение минерального и химического состава руд и мономинеральных продуктов с целью определения разновидностей минералов и отдельных элементов, подлежащих извлечению;
- изучение минералогических особенностей вкрапленности и характера срастания минералов для определения рациональных методов разупрочнения и раскрытия сростков и режима измельчения;
- изучение форм вхождения ценных элементов в отдельные минералы и установление оптимальных методов их извлечения;
- минералого-технологическое картирование с выделением различных типов руд и минерального сырья, позволяющее наиболее эффективно обогащать и использовать полезные компоненты с учетом экологических требований;
- установление структурно-чувствительных свойств минералов и рациональных видов энергетических воздействий для их направленного изменения

и создания требуемой контрастности при интенсификации процессов разделения минеральных комплексов;

- минералогическое и химическое изучение отвальных продуктов, определение путей их утилизации и создание малоотходной, а в дальнейшем и безотходной технологии переработки сырья;

- определение минералов и элементов, представляющих опасность с экологической точки зрения, разработка решений, предотвращающих или снижающих экологический риск.

Рассмотрим основные направления технологической минералогии.

**Минералого-технологическое картирование** получило широкое распространение при геолого-технологической оценке месторождений практически всех видов полезных ископаемых. Исключительная важность этого вида картирования состоит, прежде всего, в возможности научно обоснованного прогнозирования изменчивости состава, структуры и свойств минералов рудного тела, оптимальной переориентации и перестройки технологических схем и цепи аппаратов предприятия, планировании качественно-количественных показателей обогащения.

Для разработки указанной технологической стратегии должны быть выполнены следующие исследования и работы:

- выделение технологических разновидностей руд данного месторождения, устанавливаемых на основе комплекса минералогических данных о ценных и вредных компонентах;

- определение устойчивости состава рудного тела в вертикальном и горизонтальном направлениях;

- определение важнейших минералого-технологических параметров руд;

- определение поведения каждой разновидности руды в основных технологических процессах с оценкой их обогатимости;

- оценка уровня технологической опробованности всех основных разновидностей руд.

Результатом этих работ являются минералого-технологические карты, содержащие в виде изолиний (или в виде других форм) информацию о пространственной изменчивости вещественного состава разновидностей рудных тел месторождения. Наиболее существенной информацией карт могут быть не столько сами показатели обогащения, сколько минералого-химические характеристики руд. В последнее время большое внимание уделяется диагностике токсичных компонентов и составлению соответствующих карт.

Минералого-технологические карты важны не только для прогнозирования стабильности показателей обогащения, но и для химико-металлургических процессов, в которых объектами изменчивости состава и свойств выступают концентраты.

Возможности резкого увеличения числа исследуемых проб существенно повышают достоверность минералого-технологических карт.

**Изучение особенностей вкрапленности и взаимопрорастания зерен в минеральных агрегатах** во многом определяет ключевую проблему рудоподготовки – селективное разрушение минералов при раскрытии сростков. В разработке научных основ раскрытия сростков прослеживаются два основных направления: первое – углубление минералогических и кристаллохимических знаний о зонах контактов срастания минералов, второе – научно-методическое обоснование новых методов разупрочнения межзеренных контактов с целью повышения эффективности раскрытия сростков при измельчении. Естественно, что разработка методов разупрочнения и раскрытия контактов базируется на познании специфических физических и химических свойств сростков.

Прежде всего в обозначенных задачах важно установить с помощью микроскопических методов размеры рудной вкрапленности и специфические черты контактирования рудных и породообразующих минералов.

Если руды с размерами вкрапленности зерен классов I–VI успешно обогащают традиционными методами, то микроскопические и особенно субмикроскопические включения не раскрываются в достаточной мере даже после измельчения до 44 мкм, следовательно, руды с такой минерализацией нельзя удовлетворительно обогащать. В ряде случаев их целесообразно направлять на металлургическую переработку без предварительного обогащения. Кроме установления характера вкрапленности и степени раскрытия минеральных срастаний можно, поместив под микроскоп шлиф минерального сырья, определить в первом приближении его обогатимость, а затем на основании данных, полученных при микроскопических исследованиях, выбрать методы обогащения руды и извлечения отдельных минералов.

В последние десятилетия значительно углубились и расширились исследования структурных, физико-химических и энергетических свойств и особенностей контактных зон между минералами. В частности, выполнены исследования по установлению зависимости вскрываемости минералов от удельной поверхности контактных зон. Эта зависимость охватывает микрорельеф граней, особенности сколов и внутренней структуры, т.е. факторы, определяющие селективность освобождения зерен от сростков. Исключительно ценную информацию при этом дает компьютерный анализ изображений.

Наиболее изученными методами разупрочнения контактов в минеральных комплексах являются механические, термические, акустические, радиационные и электромагнитные воздействия.

При механических способах разупрочнения минеральные агрегаты подвергаются сжимающим и растягивающим нагрузкам, вызывающим в результате возникновения касательных и нормальных напряжений ослабление межзеренных связей и образование микротрещин. Сжимающие нагрузки наиболее полно проявляются при повышении давления окружающей среды – водной или воздушной. Несмотря на высокую энергоемкость, процесс имеет большие перспективы при селективном измельчении дорогостоящих минералов.

Термическое разупрочнение связано с образованием и перемещением дефектов в зонах срастания, а также с фазовыми превращениями. Возникающие при этом напряжения приводят к разупрочнению и снижению механической прочности межзеренных контактов. Важно предусмотреть, чтобы при термических воздействиях минералы не теряли своих ценных технических качеств.

Акустическая обработка заключается в воздействии на руды колебаний высокой частоты. Минералы поглощают часть энергии ударных волн, в результате чего возникают растягивающие напряжения на поверхности контактов.

В последние годы выполнен цикл работ по радиационному разупрочнению межзеренных контактов с использованием мощных промышленных ускорителей. На примере оловянных, полиметаллических и железных руд показана эффективность этого вида разупрочнения, механизм которого также заключается в образовании трещин в зонах срастания под воздействием ускоренных электронов с энергией 0,6–1,7 мэВ.

Магнитные воздействия целесообразно использовать для руд с минералами, обладающими ферромагнитными свойствами. Эффект магнитострикции приводит к созданию значительных напряжений на границе срастания минералов и разупрочнению последних.

Приведенные методы разупрочнения представляют собой значительный потенциал в совершенствовании процессов рудоподготовки, которые все в большей мере из вспомогательных переходят в разряд основных процессов с селективным раскрытием минералов. Разнообразие минерализации горных пород, генетические особенности рудных и породообразующих минералов, существенные различия в характере связи минералов в рудах дают основание рассматривать селективное разрушение как самостоятельный процесс, аналогичный селективному извлечению.

**Изучение минерального и химического составов руд.** Современные физические и химические методы анализа обеспечивают достаточно точную диагностику всех основных минеральных компонентов и элементов руд. Минералы, присутствующие в руде, принято разделять на рудные и породообразующие, а в зависимости от количественного состава – на главные (более 10 %), второстепенные (1–10 %), акцессорные (0,1–0,9 %), редкие (0,09–0,01 %) и весьма редкие (меньше 0,01 %). Например, в железных рудах второстепенными нередко выступают минералы титана, меди, вольфрама. Часто в них имеется пирит, содержащий в качестве редких и весьма редких элементов кобальт и золото. Для медно-колчеданных руд характерно присутствие галенита, сфалерита, благородных и других металлов. В ртутных рудах фиксируют флюорит и минералы сурьмы. Руды сурьмы и ртути, в свою очередь, ассоциируют с золотом. Представители редкоземельных (монацит, ксенотим) встречаются в циркон-ильменитовых россыпях и т.д.

Количественный минералогический анализ с помощью традиционных микроскопических методов целесообразен при диагностике минералов с содержанием выше 0,1 %, ниже этого порога его возможности резко снижаются.

Опорной информацией элементного состава являются данные химических и физико-химических анализов – гравиметрического, титрометрического, фотометрического, электрохимического, рентгеноспектрального, микрофазового, ядерно-физических и ряда других методов. При диагностике минералов во многих случаях целесообразно сочетание оптико-минералогических методов с физическими – рентгенографическим, термическим, инфракрасной спектроскопии (ИКС), радиоспектроскопическим, электронно-микроскопическим и др.

Одна из основных задач технологической минералогии – установление характера зависимости физических и химических свойств минералов от их элементного состава и кристаллохимических особенностей с целью оптимизации процессов сепарации и комплексного использования полезных ископаемых. Эта задача усложняется тем, что прежние представления о минералах как об однородных объектах претерпели коренные изменения, и в настоящее время считается твердо установленным фактом микронеоднородность реальных минералов, обусловленная присутствием в них включений других минеральных фаз. Микровключения могут иметь различную природу, образовываться в процессах роста кристаллов в результате изменения состава среды, быть твердым продуктом реакций различных по составу растворов, результатом раскристаллизации коллоидных веществ при повышении температуры и давления. Но нередко включения обусловлены эпигенетическими факторами, проявляющимися после основной фазы рудообразования, чаще всего возникают по трещинам кристалла и имеют вид мельчайших частиц и прожилок.

Многokратное увеличение информации о составе и структуре собственно минерала и микровключений достигается предварительным разделением руды на мономинеральные фракции. Разновидностей методов и аппаратуры, применяемых в минералогии для сепарации, существенно больше, чем используемых в промышленности, так как минералогические исследования не лимитированы низкой производительностью процесса, высокой стоимостью аппаратов и реагентов (в частности, тяжелых жидкостей). Естественно, полная информация о вещественном составе руды должна быть получена в результате анализа рудных и породообразующих минералов. Такая информация исключительно важна для обоснования оптимальных схем извлечения ценных элементов, а также для комплексности использования руд.

Довольно часто рудные минералы содержат не один, а несколько полезных компонентов. В частности, для сфалерита характерно содержание кадмия, индия, а иногда германия, ртути и галлия, извлекаемых совместно с цинком. Но при прогнозировании извлечения следует учитывать существенные колебания содержания дополнительных элементов в пределах одного рудного поля. В геолого-технологических картах также должна учитываться подобная изменчи-

вость, а технологам необходимо вносить корректировки в соответствующие процессы.

Всестороннему минералого-химическому анализу должны подвергаться вмещающие породы, часто являющиеся носителями сопутствующих элементов. Изменение минерального состава пород обычно сопровождается преобразованиями в составе элементов-спутников. Например, количественный состав таких элементов, как галлий, таллий, германий и других, являющихся спутниками полиметаллических руд, зависит от типа вмещающих пород – силикатных или карбонатных, и преобладает в ассоциации с последними.

#### **Изучение форм вхождения ценных элементов в отдельные минералы.**

Для современного этапа изучения вещественного состава прежде всего характерно повышение информативности фазового анализа. Как отмечалось ранее, отдельные элементы могут находиться в минералах в виде микровключений собственных фаз, входить изоморфно в структуры рудных и породообразующих минералов, располагаться в дефектах кристаллических структур и, особенно в межблочных областях, быть сорбированными поверхностью зерен при коллоидном или аморфном их состоянии. В свете представления В.И. Вернадского о том, что «минералы – это продукты химических реакций, протекающих в земной коре», становятся понятными многообразие форм нахождения элементов и характерная для большинства минералов микронеоднородность.

Для решения аналитических задач используют высокочувствительные методы с пределом обнаружения элементов  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  %, а в отдельных случаях с пороговой чувствительностью  $10^{-12}$  %. Обязательным методическим подходом становится комплексование химических анализов с электронно-зондовыми, электронно-микроскопическими, а также с методами колебательной и радиочастотной спектроскопии и др.

Коренные изменения претерпели некоторые воззрения на характер внедрения элементов-примесей в минералы. Привлечение электронных методов анализа привело к тому, что многие внедрения, ранее относящиеся к изоморфному замещению, теперь рассматриваются как самостоятельные фазы микровключений или сочетания нескольких фаз. Последние характерны как для рудных, так и нерудных минералов. При расчете химических элементов они должны учитываться отдельно и входить в общий баланс компонентов минералов, сепарируемых при обогащении руд.

Изучение и извлечение элементов-спутников выросло в отдельную проблему. Кроме установления форм вхождения элементов-спутников и их количественного участия решают сложные задачи их распределения в продуктах обогащения и установления корреляции между сопутствующими элементами и основными минералами. На основании полученных данных разрабатывают технологии извлечения элементов-спутников.

Еще более сложной задачей является составление баланса подлежащих извлечению элементов-спутников, прежде всего из-за их небольшого содержания.

Когда чувствительность применяемых методов оказывается недостаточной, целесообразно вести определения по мономинеральным фракциям или обогащенным продуктам.

Комплексная минералого-химическая информация в сочетании с кристаллохимическими особенностями, влияющими на технологические свойства руд, служит основой выбора технологии их переработки. Технологам крайне важно знать все формы нахождения полезных (или вредных) элементов руды и их количественный состав. Изучение на этой основе делимости, обогатимости и извлекаемости минералов и элементов позволяет прийти к заключению о технологической и экономической целесообразности:

- получения концентратов, удовлетворяющих условиям и требованиям;
- получения бедных концентратов с последующей их пирометаллургической переработкой (при этом важно выделение богатых концентратов с небольшим извлечением);
- изыскания методов направленного изменения технологических свойств на основе известных методов воздействий.

**Структурно-чувствительные свойства минералов и рациональные виды энергетических воздействий с целью направленного изменения свойств.**

Направленное изменение технологических свойств, определяющих делимость минералов, является быстро развивающейся областью технологической минералогии. Актуальность проблемы объясняется тем, что именно на пути направленного изменения свойств возможна разработка новых методов и технологий переработки труднообогатимых руд сложного состава, применительно к которым традиционные методы обогащения нерезультативны.

Невозможность эффективного обогащения определяется рядом факторов, среди которых особо следует выделить близость или идентичность разделительных свойств (характерно для окисленных руд цветных металлов, полевых шпатов, алюмосиликатов и др.) и взаимопрорастания минералов вплоть до эмульсионной вкрапленности, в результате чего практически невозможно селективное раскрытие. К таким объектам относятся некондиционные руды эксплуатируемых месторождений, техногенные месторождения различного происхождения, новые нетрадиционные виды минерального сырья, а также минеральные комплексы с близкими кристаллическим строением и химическим составом индивидуумов (одноименные катионные или анионные группы).

В зависимости от решаемых задач структурно-химическим преобразованиям подвергают поверхностно-приповерхностные слои минерала или даже его объем. В результате увеличивают контрастность и градиент свойств или один из минералов подвергают коренной фазовой перестройке. Несмотря на высокую энергоемкость, объемные превращения нашли промышленное применение: например, обжиг магнитных руд, при котором на обогащение направляют уже преобразованные по структуре и составу искусственные минералы.

Большое будущее принадлежит энергетическим методам изменения поверхностных слоев минералов. Это определяется тем, что ведущий и наиболее универсальный метод обогащения – флотация базируется на поверхностных свойствах минералов. Хотя и при использовании других методов, в частности магнитной или электрической сепарации, селективное преобразование поверхностных свойств позволяет интенсифицировать обогатимость многих типов сырья.

Структурно-чувствительные свойства изменяют с помощью электрохимических, ультразвуковых, радиационно-термических, механохимических (механодеформационных), гидрохимических и ряда других методов.

Электрохимический метод регулирования свойств минералов широко применяют в технологиях первичной переработки руд. Сущность метода состоит в изменении химических, физических и физико-химических свойств на основе электрохимических процессов при катодной и анодной поляризации.

В результате электрохимической обработки на поверхности минералов образуются новые соединения и фазы, определяющие сорбционные и флотационные свойства. Метод прочно вошел в теорию и практику флотации руд, и в первую очередь сульфидных. При использовании его увеличивается извлечение меди, никеля, свинца, цинка, золота на 1,5–5 % при повышении производительности процесса в 1,3 раза.

Вместе с тем возможности электрохимических воздействий не ограничиваются флотационными процессами. Они эффективны также при регулировании магнитных свойств минералов, так как позволяют увеличить магнитную восприимчивость слабомагнитных минералов (гематит, мартит, сидерит и др.) и на этой основе интенсифицировать процесс магнитной сепарации.

Ультразвуковая обработка минералов используется для направленного изменения магнитных, электрических, флотационных и даже гравитационных свойств с помощью ультразвуковых колебаний различной частоты (от 20 до 1000 МГц) в зависимости от технологических задач. В результате применения метода ультразвуковой обработки возникают дефекты структуры, преобразуются кристаллохимические свойства поверхностных слоев, и поверхности очищаются от примесей адгезионной природы. Кроме того, ультразвуковой метод известен как метод селективной дезинтеграции минеральных комплексов. Флотированность многих минералов после ультразвуковой обработки пульпы повышается. Одновременно с этим улучшается селективность процесса. Факторами улучшения следует считать образование активных центров на поверхности и ее очистку.

Радиационные методы управления физико-химическими свойствами минералов основаны на действии гамма-лучей, нейтронов, ускоренных электронов и других воздействий. При упругом рассеянии энергии быстрых электронов изменяется характер колебаний атомов в решетке, в результате – атермический нагрев образца с образованием различного рода дефектов. При неупругом рассея-

нии передача энергии атомами вещества переводит электроны на возбужденные уровни, в результате образуются возбужденные электроны.

Благодаря созданию ускорителей мощностью свыше 100 кВт и непрерывности процесса обработки исследования этого плана в последние годы получили новый импульс. Наиболее ценным результатом исследований можно считать перспективность роста эффективности селекции при раскрытии минеральных сростков на основе предварительной обработки руд и продуктов ускоренными электронами. Эффективность измельчения по селекции и выходу продуктивных, благоприятных для обогащения классов установлена для оловянных, железных, сульфидных и редкометалльных руд.

Механохимические (механодеформационные) воздействия в той или иной мере проявляются уже при обычном тонком измельчении руд перед обогащением. При разрушении образуются частицы с различными типами дефектов и энергетическими уровнями поверхности. Переход от одних типов мельниц и режимов измельчения к другим (например, от обычного шарового измельчения к самоизмельчению) или к процессу с большей энергией воздействия на частицы (центробежному, вибрационному и дезинтеграторному разрушению), как правило, приводит к образованию поверхностей с различными степенью дефектности структуры и физико-химическими свойствами. Этот аспект измельчения еще мало учитывается технологами, хотя указанные изменения оказывают заметное влияние на селективность разделения, особенно флотационного.

Механохимическая активация перспективна при интенсификации процессов химического обогащения и бактериального выщелачивания, автоклавной переработки, спекания, термических превращений и других методов обработки.

Механохимия является технологией будущего, ее возможности непрерывно расширяются.

Гидрохимические воздействия проявляются в изменении кристаллохимических свойств поверхностных слоев или фазовых превращениях всего объема минерала. Чем больше степень дефектности поверхности, тем выше ее реакционная способность к растворению отдельных элементов и сорбции ионов и молекул.

Обработка поверхности химическими реагентами все больше рассматривается как структурно-химическое воздействие с целью интенсификации не только флотационного, но и других методов сепарации.

Широкие перспективы преобразования фазового состава имеют автоклавные воздействия. Немалые возможности имеет бактериальный процесс как метод управления технологическими свойствами минералов. Еще ряд интересных физических методов воздействия на фазовые превращения в минералах, как например плазменная обработка, находятся в стадии исследований.

### **Минералогическое и химическое изучение отвальных продуктов.**

Одним из актуальных направлений исследований в области обогащения полезных ископаемых является технолого-минералогическая оценка техногенных месторождений на основе современных программно-аппаратных комплексов.

Техногенные месторождения по принципам их образования и минералогическому составу разделяются на две основные разновидности. К первой относятся горные породы кровли, вмещающие породы, пустые по целевым элементам пласты, а также рудные тела с низким некондиционным содержанием ценных компонентов. Вторая разновидность представлена хвостами обогащения, металлургическими шлаками, гидрометаллургическими кеками, золами углей и нефтей, рудными угольными шлаками и др.

Сотрудничество специалистов геологического и технологического профилей в последнее десятилетие привело к созданию ряда оригинальных технических решений по утилизации отходов с получением ценных продуктов и разработке малоотходной технологии переработки сырья. Вмещающие породы могут служить основой для получения извести, цементных продуктов, строительных материалов, наполнителей бетонов, а также использоваться как гравий, бутовый камень и в других целях.

К успехам технологической минералогии и петрографии следует отнести создание новых легковесных строительных материалов – петрозита и сиберфрома. Первый получен из магматических пород, второй – из цеолитовых туфов, нередко являющихся вскрышными породами руд.

Задачи исключительной сложности и важности стоят перед технологической минералогией в связи с предстоящим широким использованием хвостов обогащения руд и углей. Отходы обогащения, формирующиеся в течение многих лет из руд разных горизонтов и участков, а нередко из разных месторождений, имеют сложный минеральный состав, существенные различия в характере вкрапленности, взаимопрорастании индивидов, размерах и морфологии частиц, их окисленности, степени изменения поверхностных слоев частиц химическими реагентами, а также другие особенности, усугубляющие трудности их обогащения.

При переобогащении хвостов дополнительное извлечение ценных компонентов часто не превышает 20–40 % их содержания в этом продукте. Дальнейшее повышение пределов извлечения связано с установлением минералогических и химических особенностей форм вкрапленности, разработкой селективной дезинтеграции сростков и направленным изменением технологических свойств.

Минеральные сростки в хвостах обогащения отличаются повышенной прочностью, и для их разрушения предпочтительны мельницы высокой энергонапряженности – центробежные, вибрационные и др. Если не представляется возможным раскрыть сростки, то выделяют сравнительно бедный концентрат, который затем направляют на металлургический передел.

Усиление контрастности разделительных свойств обеспечивается применением вышерассмотренных энергетических воздействий – радиационных, элек-

трохимических, механохимических, ультразвуковых. Последние эффективны также при снятии окисленных пленок с сульфидов и реставрации поверхностных свойств. Кроме того, целесообразны методы гидрофобизации поверхности элементарной серой и другими сульфидизаторами, полезно привлечение методических подходов экспериментального минералообразования.

Широкие перспективы кроются в использовании нетрадиционных методов переработки минерального сырья. Так, хвосты фосфатных руд могут успешно перерабатываться кучным выщелачиванием. На основе применения специально-го геотехнологического растворителя получены новые виды концентрированных удобрений типа нитроаммофоса.

Изменение экономических оценок при освоении новых месторождений выдвинуло техногенное сырье на передний план использования. Создание новых методов его переработки должно базироваться на самых современных методах минералогических исследований.

#### **Определение экологически опасных минералов и элементов.**

Разработка технологических решений по охране окружающей среды и снижению экологического риска при освоении недр во многом базируется на минералогических исследованиях и их данных. Возник новый раздел минералогии – **экологическая минералогия**, которая в сочетании с методами технологического направления призвана изучать и оценивать с экологических позиций действия токсикантов и загрязнителей среды.

К числу наиболее опасных элементов относятся ртуть, свинец, мышьяк, кадмий, хром, никель, кобальт, молибден, селен, медь, цинк, бериллий, таллий. Еще на стадии разведки месторождения очень важно установить наличие, закономерности распределения, формы вхождения токсичных компонентов в минералы и дать научный прогноз возможных вариантов их перехода в воздушную и водную среды при разрушении, измельчении и преобразовании фазовых форм в процессах обогащения и переработки руд. Необходимо учитывать, что отнесение элементов к категории вредных по их содержанию в исходной руде является условным, ибо при обогащении, как правило, имеет место многократное увеличение их концентраций в различных продуктах. В результате элемент, не относящийся к разряду опасных, с повышением его содержания в продукте переходит в эту категорию. Серьезную экологическую опасность представляет также загрязнение атмосферы газами предприятий и пылью шлаковых отходов, угольных зол и др.

Ученые горного профиля уделяют большое внимание оценке экологического риска и его источникам при переработке и использовании различных типов минерального сырья. Яркой иллюстрацией этого служат исследования форм серы в углях, проводимые рядом институтов под научным руководством В.А. Чантурия. Детальное изучение этой давней проблемы на новой методической и аппаратной базе и определение размеров и характера вкрапленности сульфидов как носителей серы создают основу для разработки эффективных обогатитель-

ных методов снижения содержания серы в углях и выбросов двуокси углерода в атмосферу при сжигании углей.

Значительные успехи достигнуты в оздоровлении экологической обстановки водоемов путем создания пролонгированных минеральных форм удобрений, в результате чего существенно сокращается вынос химических веществ ливнями, дождевыми и снеговыми водами и т.д.

Специальное изучение сорбционных свойств пористых минералов применительно к задачам экологии позволило использовать ряд природных сорбентов для очистки промышленных вод обогатительных предприятий от остатков флотореагентов. Значительный интерес с этой точки зрения вызывают природные цеолиты, эффективность которых установлена по отношению к жирнокислотным собирателям, аминам и другим реагентам. Вполне удовлетворительные показатели достигнуты также при очистке промышленных газов от двуокси углерода и серы с помощью цеолитов.

Использование минералов-сорбентов расширило возможности перехода предприятий на систему замкнутого водо- и воздухооборота, позволило снизить выбросы в окружающую среду.

Предметом специальных минералогических и геохимических исследований стали хвостохранилища обогатительных и металлургических предприятий как потенциальные источники токсичных элементов. Созданы геохимические модели оценки взаимодействия сернокислых растворов, образующихся при окислении хвостов сульфидных руд, с вмещающими породами. При карбонатном составе вмещающих пород сернокислая среда нейтрализуется и уровень экологической опасности резко снижается. В случае вмещающих пород с инертной кремнистой основой (кварциты, песок и др.) возможно появление в дренажных водах сульфидов и даже свободной серной кислоты.

Минералогическая наука обладает большими возможностями в решении экологических проблем. Технологическая минералогия прочно вошла в число основных разделов обогащения полезных ископаемых, и изучение состава, строения, физико-химических и технологических свойств минералов при обосновании процессов извлечения ценных компонентов из минерального сырья стало первым и обязательным этапом исследований. На этой основе разработаны оптимальные технологии обогащения и переработки всех видов руд, необходимых стране.

Резко возросли требования к качеству продуктов обогащения и ограничения по сырью в экологических нормативах.

Научно-технические достижения XX века существенно изменили содержание минералогии: она превратилась в многоплановую дисциплину с современными физической и химической базой и методами исследования. Именно на этой основе возможен прогресс в освоении труднообогатимых руд, комплексном использовании минерального сырья, создании энергосберегающих и малоотходных технологий, разработке эффективных мер охраны окружающей среды.

### Список литературы к разделу 5.3

1. Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геолого-разведочных работ. – М.: Недра, 1981.
2. Перепелицын В.А. Основы технической минералогии и петрографии. – М.: Наука, 1989.
3. Афанасьева Е.Л., Исаенко М.П. Технологическая минераграфия. – М.: Недра, 1988.
4. Изюитко В.М. Технологическая минералогия вольфрамовых руд. – М.: Недра, 1980.
5. Иванов О.П., Кушпаренко Ю.С., Маршукова П.К. Технологическая минералогия оловянных руд. – Л.: Наука, 1989.
6. Технологическая минералогия гипергенных никелевых руд / А.С. Вершинин [и др.]. – М.: Наука, 1988.
7. Сидоренко Г.А., Александрова И.Т., Петрова Н.В. Технологическая минералогия редкометалльных руд. – СПб.: Наука, 1992.
8. Барский Л.А. Основы минералургии. Теория и технология разделения минералов. – М.: Наука, 1984.
9. Ревнивцев В.И. О теоретических основах направленного изменения технологических и технических свойств минералов при первичной переработке полезных ископаемых // Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов: межведом. сб. науч. тр. – Л., 1985. – С. 3–8.
10. Чантурия В.А., Беседин Е.Г., Баилыкова Т.В. Использование компьютерного анализа изображений для прогнозной оценки глубокого обогащения высокосернистых углей // Уголь. – 1995. – № 11. – С. 50–53.
11. Гершойг Ю.Г. Вещественный состав и оценка обогатимости бедных железных руд. – М.: Недра, 1986.
12. Технологическая минералогия железных руд / под ред. В.И. Ревнивцева. – Л.: Недра, 1988.
13. Селективное разрушение минералов / под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988.
14. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья. – М.: Недра, 1990.
15. Направленные изменения свойств минералов посредством ультразвукового, радиационного и других воздействий / Л.С. Солнцева [и др.] // Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов / ВИМС. – Л., 1985. – С. 8–16.
16. Перспективы использования энергии ускоренных электронов в процессах первичной обработки руд / Г.Р. Бочкарев [и др.] // Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых. – М.: Наука, 1989. – С. 175–183.
17. Методы минералогических исследований. – М.: Недра, 1985.

18. *Сидоренко Г.А.* Современный фазовый анализ как средство оценки качества и обоснования путей технологической переработки минерального сырья // Обогащение руд. – СПб.: Наука, 1996. – С. 32–35.
19. *Молчанов В.И., Юсупов Т.С.* Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов. – М.: Недра, 1981.
20. *Лантева Е.С., Юсупов Т.С., Бергер А.С.* Физико-химические изменения слоистых силикатов в процессах механической активации. – Новосибирск: Наука, 1981.
21. *Юсупов Т.С.* Измельчение как способ генерации дефектов в минералах с целью интенсификации химико-обогажительных процессов // Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов: межведом. сб. науч. тр. / Механообр. – Л., 1985. – С. 68–75.
22. Флотационно-химическое обогащение фосфатных руд / *В.Н. Шохин [и др.]*. – М.: Недра, 1991.
23. *Чантурия В.А., Ревнищев В.И.* Проблемы комплексной переработки минерального сырья / Комплексное освоение месторождений твердых полезных ископаемых: тр. Моск. гос. ин-та. – М., 1991. – Вып. 1. – С. 41–50.
24. *Чантурия В.А., Дмитриева Г.М., Трофимова Э.А.* Интенсификация обогащения железных руд сложного вещественного состава. – М.: Наука, 1988.
25. *Чантурия В.А.* Электрохимическая технология в процессах первичной переработки руд // Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых. – М.: Наука, 1989. – С. 119–127.
26. *Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е.* Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. – М.: Наука, 1993.
27. *Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е.* Научные основы и промышленное применение энергии ускоренных электронов в обогажительных процессах // Изв. вузов. Горный журнал. – 1995. – № 7. – С. 53–57.
28. *Юсупов Т.С., Королева С.М.* Влияние механической активации на депрессию кварца при флотации // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 1985. – № 6. – С. 92–95.
29. К проблеме направленного изменения флотиремости минералов на основе механических воздействий / *Т.С. Юсупов [и др.]* // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 1987. – № 5. – С. 94–97.
30. *Юсупов Т.С.* Физико-химические изменения минералов при тонком измельчении в связи с интенсификацией процесса химического обогащения // Интенсификация процессов обогащения минерального сырья. – М.: Наука, 1981. – С. 94–98.
31. *Черняк А.С.* Химическое обогащение руд. – М.: Недра, 1987.
32. *Масленицкий Н.Н., Беликов В.В.* Химические процессы в технологии переработки труднообогатимых руд. – М.: Недра, 1985.

33. Исследование процесса сульфидирования окисленных медных руд на стадии измельчения / *Б.Н. Омаров [и др.]* // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск, 1993. – С. 100–109.

34. *Чантурия В.А.* Направления исследований в области обогащения полезных ископаемых // Горный вестник. – 1995. – Т. 2. – С. 37–42.

35. Техногенное минеральное сырье России и направления его использования: инф. сб. / АО «Роскедра», ЦНИИ Геол. неруд. – М., 1994. – Вып. 1.

36. *Гавриленко В.В.* Экологическая минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых. – СПб.: Изд-во СПб.ГГУ им. Плеханова, 1993.

37. *Изоитко В.М.* Проблемы и достижения технологической минералогии // Обогащение руд. – 1995. – № 1–2. – С. 48–53.

#### **5.4. Дезинтеграция и подготовка минерального сырья к обогащению**

**Селективная дезинтеграция** – наука о методах и средствах направленного изменения характеристики качества минерального вещества и дезинтеграции его на фазы, контрастные по содержанию компонента.

Под **рудоподготовкой** следует понимать комплекс операций, охватывающих все технологические процессы после добычных горных работ и до раскрытия минералов при измельчении в обогатительном переделе, обеспечивающих получение из горной массы товарной руды для прямой химико-металлургической переработки или кондиционной руды для обогащения.

Переработка минерального сырья начинается с процессов дезинтеграции – **дробления и измельчения**. В идеале результатом этих процессов должно быть получение смеси отдельных зерен полезных минералов и минералов пустой породы при энергетических затратах только на разрыв межатомных связей по поверхностям их срастания. Однако при современном уровне технологии и техники дезинтеграции отсутствуют способы селективной подачи энергии в зоны межфазных контактов, поэтому эффективность массовых технологий разрушения чрезвычайно низка: полезное использование энергии в них не превышает 1 %. Таким образом, основная научная проблема – поиск научно обоснованных путей и принципиально новых способов селективного разрушения минеральных ассоциаций при наименьших затратах энергии.

Дальнейший прогресс механического разрушения горных пород с целью дезинтеграции целиком зависит от развития фундаментальных исследований в области физики разрушения, динамики машин, и развития смежных наук, таких как физика твердого тела, физическая химия, реология, теория удара, теория колебаний и волн, материаловедение, машиноведение и т.д. При этом определяющее значение имеют физика разрушения и динамика машин.

Главной проблемой теории дезинтеграции горных пород является выявление закономерностей, позволяющих количественно оценить энергоемкость дезинтеграции в зависимости от гранулометрического состава ее продуктов. Такая

задача представляется весьма сложной вследствие большого числа параметров, определяющих процесс дезинтеграции, и из-за необходимости получения простых инженерных формул, позволяющих производить практические расчеты. При этом не подлежит сомнению, что теория дезинтеграции должна основываться на законах строения и разрушения твердых тел. За длительный период исследований получен ряд технологических формул, используемых при проектировании машин и позволяющих в той или иной степени правильно прогнозировать параметры их работы.

В тесной связи с проблемой определения расхода энергии на дезинтеграцию находится оценка гранулометрического состава продуктов дробления и измельчения. Важно также уметь правильно определять средний размер частиц дробимого и дробленого материалов.

Энергоемкость существующих методов дробления и измельчения определяли многие исследователи. Доказано, что наиболее энергоемкими являются щековые и конусные дробилки, бегуны, мельницы шаровые и самоизмельчения. Однако эти аппараты широко применяют благодаря их высокой надежности и возможности дезинтегрировать очень твердые материалы. В промежуточную группу попали молотковые дробилки и вибрационные мельницы. Наиболее экономичными оказались валковые дробилки, кольцевые (роликовые и шаровые) мельницы и пальцевые дезинтеграторы. Для измельчителей последней группы характерны разрушение свободного зерна в монослое и быстрое удаление материала из зоны разрушения. К сожалению, рабочие органы этих машин интенсивно изнашиваются.

Селективность раскрытия минералов в наименьшей степени осуществляется в конусных и щековых дробилках, поскольку их жесткая кинематическая схема не позволяет регулировать усилия дробления. Более селективно происходит высвобождение минеральных агрегатов в дробилках ударного действия, в частности молотковых. Эффективный агрегат для селективного раскрытия руд – мельница рудного самоизмельчения.

Селективность дезинтеграции руды можно существенно повысить путем соответствующей подготовки – разупрочнения материала по межзерновым границам. При этом разупрочнению должен подвергаться не только поверхностный слой, но и весь объем куска руды. Желательно также, чтобы при разупрочнении прочностные свойства зерен полезных минеральных компонентов существенно не снижались во избежание их переизмельчения. В зависимости от свойств минеральных компонентов могут быть использованы несколько способов реализации таких условий.

Для разупрочнения пород, сложенных минералами, существенно отличающимися по упругим свойствам, рекомендуются **механические способы** воздействия, например низкочастотные знакопеременные напряжения.

**Термический способ** применим для материалов, минералы которых различаются по термическим коэффициентам расширения. Нагрев может быть осуще-

ствлен как путем конвекционного теплообмена, так и инфракрасным, высокочастотным или низкочастотным потоком электромагнитной энергии.

**Акустический способ** заключается в воздействии на материал, находящийся в водной или воздушной среде, колебаний высокой частоты.

**Электрохимический метод** высокоэффективен для сульфидных руд. В процессе поляризации сульфидов на границе контакта минералов протекают электрохимические реакции с образованием новых фаз, что приводит к разрушению минеральных комплексов по границам срастания.

**Магнитострикционный способ** применим для руд, содержащих ферромагнитные минералы. Перспективны различного рода **радиационные способы**, вызывающие ионизацию и электронное возбуждение материала, что во многих случаях приводит к ослаблению и разрыву связей между минералами.

Необходимо отметить, что традиционная техника и технология дробления и измельчения руд не соответствует принципам селективной дезинтеграции. Между тем уже имеются перспективные разработки машин и отдельных элементов технологий, позволяющих осуществлять селективную дезинтеграцию, а именно дезинтеграцию энергией сжатой газообразной среды, взрывную дезинтеграцию, электроимпульсную (плазменную) и др.

Высокой степенью селективности раскрытия минеральных фаз характеризуется созданный новый класс дробильно-измельчительных машин – виброинерционных. Усилия дробления в них создаются центробежными силами инерции, а материал, разрушаемый в слое, подвергается интенсивному вибрационному воздействию. К таким машинам относятся: виброщечковая инерционная дробилка ВЩД, разрушающая куски материала метрового диапазона крупности; конусная инерционная дробилка КИД, заменяющая в одной операции дробилки среднего и мелкого дробления, а иногда и первую стадию измельчения; цилиндрическая инерционная дробилка ЦИД для переработки волокнистых материалов; вибророликовая инерционная мельница ВИМ для сверхтонкого измельчения.

Несмотря на глубокое теоретическое обоснование виброинерционных методов дробления и измельчения, остается нерешенным ряд научных проблем в данном направлении. Это прежде всего проблемы износа и предотвращения саморазрушения аппаратов (от решения указанных проблем зависит область применения виброинерционных машин в промышленности). Кроме того, актуальной остается общая для всех методов дезинтеграции проблема снижения энергозатрат.

Процесс рудоподготовки помимо дезинтеграции включает в себя операции первичного разделения фаз. Концентрацию I стадии осуществляют при поиске и разведке месторождений путем выделения природных геохимических аномалий с повышенной концентрацией отдельных элементов или минералов, II стадии – в процессе горных работ, когда массу рудных тел с прослойками пустой породы отделяют от массы горных пород, не содержащих полезные компоненты.

Распознавание технологических типов руд и пустой породы проводят радиометрическими методами при транспортировании горной массы в емкостях или в потоке на конвейере. На основе этой информации при сортировке выделяют из потока пустопородную часть и разделяют оставшуюся часть на отдельные потоки по технологическим сортам путем изменения маршрутов транспортных средств или перегрузок при конвейерном транспорте. В последующих операциях рудоподготовки применяют крупнокусковую радиометрическую сепарацию. На нее обычно направляют материал после II стадии дробления.

Широкое использование операций предварительной концентрации руд невозможно без применения методов ядерной физики и радиометрии, так как только они на сегодняшний день обладают необходимой оперативностью и экспрессностью, для того чтобы обеспечить непрерывный технологический поток надлежащей информацией, на основе которой возможно построение автоматических систем управления.

Ядерно-физические методы основаны на взаимодействии ионизирующих излучений с веществом горных пород и руд на атомно-электронном и ядерном уровнях элементов, входящих в их состав.

На взаимодействии нерадиоактивных излучений с веществом базируются другие физические методы: люминесцентный (фотолюминесцентный, рентгенолюминесцентный), основанный на возбуждении люминесценции минералов под воздействием внешнего излучения; фотометрический, в котором используются эффекты взаимодействия видимого светового излучения с веществом; термоэлектрический, основанный на взаимодействии теплового излучения со смесью минералов, обладающих различной теплоемкостью; радиоволновый, например радиорезонансный, основанный на использовании различий в электромагнитных свойствах горных пород и руд.

В тесной связи с эффективностью методов обогащения, и в первую очередь ядерно-физических, находится **контрастность руды** – различие кусков или порций руды по содержанию в них полезных компонентов. Это наиболее важная характеристика руды, так как ни при каком, даже самом совершенном обогатительном процессе нельзя выделить из руды богатый концентрат или бедные хвосты, если она состоит из кусков или частиц, мало различающихся между собой по содержанию полезного компонента.

К числу рудоподготовительных операций следует отнести **сепарацию в тяжелых средах**. Этой эффективной операции подвергаются чаще всего продукты после среднего дробления при обязательном отделении рудной мелочи и шламов. Предварительное обогащение в тяжелых суспензиях обычно позволяет выделить до 30 % поступающего на обогащение материала с отвальным содержанием ценных компонентов. Тяжелые суспензии, в которых происходит разделение материала по плотности, представляют собой смесь тонкодисперсной твердой фазы с водой.

Месторождения полезных ископаемых неоднородны по своему составу. Они характеризуются различными по технологическим свойствам разновидностями сырья и природными типами, количественные соотношения между которыми изменяются по глубине и площади месторождения. Колебания характеристик качественного состава перерабатываемых руд затрудняют управление процессами обогащения, что влечет за собой значительные потери металлов, повышенный расход реагентов, снижение производительности оборудования. Компенсировать эти потери и тем самым повысить эффективность работы обогатительных фабрик позволяет **усреднение (стабилизация)** качества руд – один из основных технологических процессов рудоподготовки.

Из природных типов руд, применяя методы предварительного обогащения (селективную добычу, радиометрическую сортировку, разделение в тяжелых средах и др.), формируют технологические типы руд. Некоторые типы являются технологически совместными и могут перерабатываться в общей смеси. Технологически несовместимые типы требуют отдельной переработки. Из технологически совместимых типов формируют шихту – рудную смесь с определенным соотношением контролируемых компонентов качественного состава.

В технологическом процессе усреднения учитывают: требования к составу шихты; имеющиеся в недрах объемы различных типов сырья; схему обогащения; систему ведения горных работ и транспортирования сырья; допустимые параметры процессов рудоподготовки и усреднения. Характер изменения качественного состава усредняемого минерального сырья чаще всего случайным образом зависит от времени или пространственных координат. Таким образом, задачи, связанные с усреднением, многовариантны и многофункциональны. Для их решения используют математический аппарат теории случайных функций.

Перспективное усреднение производят путем планирования горных работ на соответствующие более или менее длительные периоды. Оперативное усреднение, осуществляемое в течение всех смен или за сутки с использованием специальных усреднительных дозировочно-смесительных устройств, в наибольшей степени соответствует требованию бесперебойного снабжения обогатительной фабрики сырьем стабильного состава.

До недавнего времени технологическую эффективность усреднения определяли по результатам промышленных экспериментов или исследованием математических моделей технологических процессов обогащения. В последние годы используют комбинированный метод имитационного моделирования, который позволяет с учетом особенностей математических моделей процессов обогащения и отчетных данных обогатительных фабрик моделировать эти процессы с помощью ЭВМ и направленно интерпретировать эти данные как результат активного эксперимента. Дальнейшее развитие этого метода с привлечением данных по всему рудоподготовительному комплексу является перспективной задачей, решение которой позволит значительно упростить и усовершенствовать выбор технологии рудоподготовки.

Таким образом, структура науки о дезинтеграции и подготовке минерального сырья к обогащению и ее основные направления включают в себя:

- распознавание технологических типов и вещественного состава минерального сырья на основе современных ядерно-физических методов опробования;
- закономерности раскрытия минералов в процессах дробления и измельчения поступающих на обогащение полезных ископаемых с целью высвобождения индивидуальных минералов для последующего разделения в процессах обогащения;
- предварительное концентрирование полезных компонентов с использованием прогрессивных методов сортировки минерального сырья;
- закономерности классификации минерального сырья по крупности с целью повышения эффективности процессов дезинтеграции;
- направленное изменение физических свойств минералов посредством энергетических воздействий для повышения эффективности процессов дезинтеграции;
- научное обоснование методов усреднения минерального сырья с целью стабилизации качественных характеристик сырья для повышения эффективности процессов обогащения.

#### Список литературы к разделу 5.4

1. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1983.
2. Горная энциклопедия. – М.: Сов. энцикл., 1986. – Т. 2.
3. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке / под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1987.
4. Селективное разрушение минералов / под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988.
5. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В.И. Ревнивцев [и др.]. – М.: Недра, 1992.
6. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т.1. Обогащительные процессы и аппараты: учебник. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 471 с.
7. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. Т.2. Технология переработки и обогащения полезных ископаемых: учебник. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. – 510 с.
8. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учебник. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 418 с.
9. Кармазин В.В., Младецкий И.К., Пилов П.И. Технологические расчеты в обогащении полезных ископаемых: учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 221 с.

## **5.5. Физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов**

**Физические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов – это наука о методах и средствах концентрации полезных компонентов минерального сырья путем разделения минералов на основе различия их физических свойств в силовых полях.**

Данная наука рассматривает комплекс разделительных процессов, осуществляемых без изменения агрегатно-фазового состояния, химического состава, кристаллохимической структуры компонентов полезного ископаемого, а также охватывает процессы получения концентратов металлов, углей, минеральных солей, кристаллов, строительных материалов, поделочных камней, других продуктов при переработке минерального сырья природного и техногенного происхождения.

**Предметом науки** является изучение закономерностей разделительного массопереноса и распределения в продуктах обогащения минеральных компонентов в поле действия гравитационных, магнитных, электрических сил, а также сил поверхностного натяжения и комбинированных. Эти закономерности обеспечивают эффективность процессов обогащения.

Масштабы промышленного использования и научных исследований в области обогащения полезных ископаемых непрерывно возрастают. В настоящее время практически все полезные ископаемые подвергаются обогащению и первичной переработке. А поскольку потери ценных компонентов на этой стадии составляют 50–80 % общих потерь в горнометаллургическом производстве, комплекс процессов обогащения становится ключевым в решении важнейших горнотехнических проблем: рационального использования минеральных ресурсов, создания малоотходных и безотходных производств, разработки энергосберегающих технологий и т.д.

Обогащение полезных ископаемых находится на стыке горно-геологических и химико-металлургических наук, а также на стыке многих научных направлений – физической химии, механики, физики гравитационных, электрических и магнитных полей, радиационных процессов, горного машиностроения и др. Разработано несколько десятков различных методов и процессов обогащения полезных ископаемых, основанных на различии физических, физико-химических, химических и других свойств разделяемых компонентов. Однако отсутствие единой научной и теоретической базы явилось причиной неравномерности развития техники и технологии обогащения. Ряд процессов был изобретен одновременно в нескольких странах, а некоторые из них изобретались заново по несколько раз.

**Гравитационные методы обогащения** относятся к самым древним методам обогащения полезных ископаемых, основанным на различии плотностей разделяемых компонентов. Еще во времена Геродота (V в. до н.э.) использовали эндовки, шлюзы, бутары малых размеров для промывки и обогащения золотосо-

державших руд. В настоящее время промывку как метод обогащения широко применяют при переработке марганцевых и окисленных железных руд, редких металлов, фосфоритов, оловянных руд, строительных горных пород и др.

Позднее появилось обогащение в струе жидкости, текущей по наклонной плоскости стола. При этом частицы разделялись по плотности под действием силы потока воды и силы тяжести: вода, стекающая по наклонной плоскости, уносила с собой легкие мелкие частицы, в то время как более тяжелые осаждались на поверхности стола и удалялись в виде ценного продукта.

Для уменьшения потерь ценных компонентов были предложены механические подвижные устройства, которые назывались ваннерами, или концентрационными столами. В конце XIX в. А.Р. Вильфлей изобрел сотрясательный концентрационный стол, который позволил проводить операцию обогащения непрерывно. Так возник один из распространенных гравитационных методов обогащения – концентрация на столах.

Впоследствии было замечено, что обогащение зернистого материала можно осуществлять путем расслоения его на сите, периодически погружаемом в воду. Возвратно-поступательное движение сита в воде осуществлялось ручным, а впоследствии механическим способом. Такое устройство было названо отсадочной машиной, а метод – отсадкой. В 1891 г. Ф. Баум изобрел беспоршневую отсадочную машину. Метод отсадки, получил самое широкое распространение и в настоящее время является одним из основных при обогащении углей, окисленных железных, марганцевых и других руд.

Постепенное истощение запасов и ухудшение качества полезных ископаемых, вовлечение в переработку труднообогатимых руд и углей, требующих все более тонкого измельчения для раскрытия и выделения ценных компонентов, ограничивали применение традиционных методов гравитационного обогащения, что требовало от ученых и исследователей создания новых эффективных способов разделения минеральных частиц крупностью менее 10 мм. Эту задачу успешно решали на основе сочетания современных достижений гидромеханики, гидродинамики, физики, физической химии и обогащательной науки. Так, для интенсификации процессов разделения мелких частиц по плотности стали использовать замкнутые каналы и комбинированные силовые поля (гравитационные, центробежные, магнитные).

В 60-х годах был разработан метод противоточной сепарации, при которой разделение частиц по плотности осуществляется в основном под действием гравитационных сил в наклонных закрытых каналах прямоугольного сечения. Для противоточной сепарации используется целый ряд крутонаклонных сепараторов. Противоточная сепарация и трехпродуктовое обогащения мелких углей в тяжелосредних циклонах, разработанные в России, не имеют аналогов в зарубежной практике.

Гравитационные процессы обогащения по широте диапазона исходных характеристик обогащаемого сырья, разнообразию условий применения их в тех-

нологических схемах обогатительных фабрик, простоте производственного комплекса, высокой производительности обогатительных аппаратов в сравнимых условиях превосходят многие другие процессы обогащения и обеспечивают эффективное разделение минеральных смесей при относительно низких материальных, трудовых и энергетических затратах.

Гравитационные методы обогащения угля позволяют перерабатывать крупнозернистый материал с верхним пределом крупности до 300 мм. Последнее обстоятельство особенно важно, если учесть, что некоторые крупнозернистые продукты обогащения имеют значительно больший спрос потребителей и большую стоимость, чем мелкозернистые.

В угольной промышленности России действует 71 обогатительная фабрика общей годовой мощностью по переработке угля 162,4 млн т; при этом свыше 42 % угля перерабатывается в минеральных суспензиях, 32,6 % – отсадкой.

Гравитационные методы обогащения являются преобладающими при переработке хромовых руд, так как обеспечивают разделение зерен хромовых минералов крупностью до 300 мм. Окисленные железные руды крупностью от 300 до 0,5 мм обогащают в суспензиях, отсадкой, на концентрационных столах и другими способами.

В комбинированных схемах переработки полезных ископаемых гравитационные методы способствуют повышению экономичности обогатительного передела. Так, например, при применении гравитационных методов в начале процесса обогащения полиметаллических руд удаляют до 30 % отвальной породы в виде товарного продукта для строительных целей, сокращая тем самым фронт последующих переделов – измельчения и флотации, что способствует повышению экономичности работы предприятия.

Наиболее широко гравитационные процессы используют в различных сочетаниях с другими процессами обогащения: флотацией, промывкой, магнитной сепарацией, электрической сепарацией и др. В этих случаях обработку полезного ископаемого производят по сложным технологическим схемам, к которым относятся практически все схемы переработки коксующихся углей, окисленных железных руд, полиметаллических, вольфрамо-молибденовых и др.

Гравитационные обогатительные фабрики России – это высокомеханизированные и автоматизированные предприятия, оснащенные эффективным основным и вспомогательным оборудованием и использующие технологии, соответствующие мировому современному уровню развития обогащения.

**Флотационные методы обогащения.** Для обогащения моно- и поликомпонентного рудного минерального сырья применяют флотацию – разделение частиц, осуществляемое в перемешиваемой водной минеральной суспензии (флотационной пульпе), в которую тем или иным способом вводят пузырьки воздуха. Частицы минералов, плохо смачиваемые водой (гидрофобные), при соприкосновении с воздушными пузырьками прилипают к ним и всплывают на поверхность флотационной пульпы. Здесь образуется слой минерализованной

(флотационной) пены, которая самотеком или принудительно (обычно с помощью специальных гребков) выделяется в отдельный флотационный пенный продукт. Другие минералы, хорошо смачиваемые водой (гидрофильные) или не обладающие достаточной для прилипания гидрофобностью, остаются в объеме флотационной пульпы, образуя камерный продукт. Регулирование смачиваемости минералов водой осуществляют введением флотационных реагентов (химических неорганических и органических веществ).

Официальной датой возникновения флотации как метода обогащения полезных ископаемых считают 1860 г., когда в Англии В. Хайнсу был выдан патент на «метод концентрации металлов из руд и пород». Это была масляная флотация, основанная на принципе разделения путем избирательного смачивания маслом сульфидных минералов, которые вместе с маслом образовывали гранулы, всплывающие на поверхность воды. Частицы минералов пустой породы, хорошо смачиваемые водой и практически не смачиваемые маслом, оставались при этом в объеме воды. Этот способ в различных вариантах применялся некоторое время в США для обогащения медно-золотой руды при извлечении в концентрат порядка 80 % ценных минералов.

В 1904 г. в России в г. Мариуполе была пущена одна из первых в мире флотационных фабрик, работающих по принципу масляной флотации. Фабрика перерабатывала графитовую руду Старо-Крымского месторождения.

Другим направлением развития флотационного процесса явилась пленочная флотация. Суть пленочной флотации состояла в том, что мелко измельченную сухим способом руду насыпали тонким слоем с небольшой высоты на поверхность воды. При этом сульфиды (или другие плохо смачиваемые водой минералы) удерживались силами поверхностного натяжения на поверхности воды, образуя хрупкую пленку, а гидрофильные минералы пустой породы смачивались водой и опускались на дно аппарата. Этим методом в начале XX в. в США было получено свыше 300 тыс. т цинкового концентрата. Причинами отказа от широкого применения пленочной флотации явились низкая производительность аппаратуры и неустойчивость самого процесса.

Многочисленные исследования по усовершенствованию процесса флотации с целью повышения производительности и сокращения расхода масла до практически приемлемых величин доказали эффективность введения газовой фазы в масляную флотацию. Образующиеся различными способами пузырьки газа поднимали на поверхность пульпы омасленные частицы, образуя слой минерализованной пены.

К концу XIX – началу XX в. почти повсеместно истощились запасы богатых руд цветных металлов, отличавшиеся высоким содержанием металлов и крупной вкрапленностью полезных компонентов во вмещающие породы. В эксплуатацию вовлекались все в больших количествах бедные руды с тонкой вкрапленностью и сравнительно низким содержанием металлов. Масляная флотация из-за малой производительности, неэкономичности (высокий расход ма-

сел) и невозможности эффективной переработки тонкоизмельченного материала была совершенно не пригодна для обогащения тонковкрапленных бедных руд. Полученные при обогащении таких руд тонкозернистые концентраты нельзя было плавить по прежней технологии в шахтных печах без предварительной агломерации. Кроме того, масляная флотация при обогащении сульфидных руд позволяла получать лишь коллективные (полиметаллические) концентраты, тогда как для экономики и технологии цветной металлургии нужны были монометаллические концентраты.

Указанные недостатки были устранены после создания в металлургии принципиально нового технологического процесса отражательной плавки и аппаратуры для агломерации пылевидных концентратов. В обогащении полезных ископаемых появился новый метод – пенная селективная флотация, формирование которого охватывает первую четверть XX столетия.

Можно выделить три элемента, совокупность которых составляет основу современного флотационного процесса:

1) использование воздуха для флотации в виде воздушных пузырьков, вводимых тем или иным способом из атмосферы, и создание соответствующей аппаратуры, обеспечивающей экономичную и технически совершенную в количественном и качественном отношении генерацию воздушных пузырьков в условиях минеральной суспензии;

2) создание ассортимента минимума флотационных реагентов (собираателей и пенообразователей) определенного химического состава, растворимых в воде, позволяющих регулировать процесс флотации;

3) разработка методов, обеспечивающих проведение селективной флотации.

Список флотируемых минералов включает в себя практически все минералы, извлекаемые в промышленности при переработке минерального сырья. При этом число их непрерывно возрастает. Так, методом флотации извлекают свинец, цинк, медь, олово, кобальт, золото и алмазы, серу, мышьяк, сурьму и барит, литий и бериллий, вольфрам, молибден и германий, железо, хром и титан, уголь, графит, фосфориты и апатиты, растворимые соли, слюду, полевые шпаты, флюорит, минералы урана, тантала, ниобия, циркония и многие другие. Наша страна в настоящее время располагает десятками обогатительных фабрик, осуществляющих современными методами флотацию руд цветных, редких металлов, угля, растворимых солей, апатитов, фосфоритов и других видов минерального сырья. Целый ряд обогатительных фабрик (Норильская медно-никелевая, Кировская апатитонепелиновая и др.) по своей технологии, оснащению технически совершенным оборудованием, гигантской производительности являются уникальными и не имеют аналогов.

**Магнитные методы обогащения** получили развитие в первую очередь как эффективные и экономичные методы переработки железосодержащих руд.

Промышленное производство магнитных сепараторов в бывшем СССР началось в 30-е годы. Многолетний опыт совершенствования магнитных методов

обогащения в промышленных условиях и в научно-исследовательских лабораториях привел к созданию большой совокупности процессов магнитного обогащения. Для каждого из этих процессов создают, как правило, несколько типов магнитных сепараторов с различными технологическими возможностями разделения минералов (конструктивные решения процесса), производительностью и другими технико-экономическими показателями.

Магнитное обогащение является основным методом обогащения в железорудной промышленности, важнейшим процессом в обогащении руд марганца, хрома, титана, вольфрама, внедряется в технологию обогащения руд других цветных и редких металлов, в обессеривание угля и очистку различных типов сырья от магнитных примесей. Магнитные методы тесно переплетаются с гравитационными в процессах магнитогидродинамической (МГД) и магнитогидростатической (МГС) сепарации, в процессах флотации с использованием магнитного поля, а также при обогащении в тяжелых средах с магнитной регенерацией.

В области магнитного обогащения и сепараторостроения Россия занимает ведущее место в мире. Отечественные сепараторы экспортируют и в зарубежные страны.

С использованием магнитных методов решают многие технологические задачи в различных отраслях народного хозяйства. В обогащении полезных ископаемых магнитные методы являются основой получения концентратов черных металлов, редких металлов, широко применяются при переработке руд цветных и благородных металлов, угля, алмазов и многих других ископаемых. При этом решаются задачи не только извлечения ценных минералов, но и очистки их от магнитных примесей, регенерации магнитных суспензий при гравитационном обогащении, удаления металлолома и т.д. Кроме того, удаление железных и других слабомагнитных примесей магнитными методами осуществляется в стекольной, абразивной, керамической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, а также при переработке твердых бытовых отходов, скраповых металлов, строительных материалов, теплоносителей и многих других.

В настоящее время из магнетитовых концентратов выплавляют более половины всего получаемого металла, причем себестоимость его ниже, чем при прямой выплавке из богатых руд. Темпы увеличения доли обогащаемых руд постоянно растут. В настоящее время продолжают эксплуатацию, а также ведут дальнейшее совершенствование и строительство магнито-обогащительных фабрик для переработки магнетитовых руд КМА, Сибири, Северного Урала, Заполярья и других регионов, для которых уже созданы мощные магнитные сепараторы производительностью до 500 т/ч для кусковых и до 250 т/ч для тонкоизмельченных руд.

За последнее время получили развитие такие процессы, как сухая и мокрая магнитная сепарация тонкозернистых слабомагнитных руд. Впервые в мировой практике созданы крупные фабрики для обогащения мелких фракций редкометалльных и марганцевых руд в высокоинтенсивных, фокусированных магнит-

ных полях на специально разработанных отечественных высокопроизводительных валковых сепараторах.

Основные трудности магнитного обогащения связаны с переработкой весьма тонковкрапленных руд, поскольку для частиц крупностью менее 20 мкм магнитная восприимчивость и, соответственно, магнитная сила обычно в 2–3 раза ниже, чем для крупных частиц. В то же время постоянный рост производительности оборудования ведет к резкому увеличению скоростей движения пульпы и возрастанию диссипативных сил в рабочем пространстве магнитных сепараторов. При этом становится необходимым также резко увеличивать магнитные силы, что повышает себестоимость сепарации и в конечном счете определяет экономический предел ее применения, за которым предпочтение может быть отдано более дорогим физико-химическим методам обогащения, а именно селективной адгезионной флокуляции, флотации, магнетизирующему обжигу, требующим расхода реагентов и топлива.

В настоящее время отечественные наука, машиностроение и промышленность успешно осваивают новый метод обогащения тонкоизмельченных слабомагнитных руд и шламов – высокоинтенсивную полиградиентную (высокоградиентную) сепарацию. В области магнитного обогащения наша страна занимает ведущее место в мире и располагает целым рядом мощных современных обогатительных фабрик: Лебединская, Стойленская, Железногорская, Оленегорская, Костомукшская и др. Магнитные методы обогащения широко развиты во многих зарубежных странах: Германии, Чехии, Венгрии, США, Великобритании, Франции, Швеции и др.

**Электрические методы обогащения.** Возможность разделения в электрическом поле смеси компонентов, различающихся своими электрическими свойствами, известна давно. Еще во второй половине прошлого столетия исследователи использовали ее для изучения распределения электричества на поверхности непроводников.

Электросепараторы начали изготавливать в бывшем СССР с 1940 г. При этом выпускали в основном коронные электросепараторы различных типов.

В послевоенные годы работы по изучению и развитию электрических методов сепарации значительно расширились. Большие работы по изучению процессов сепарации руд, углей и других полезных ископаемых по их вещественному составу и крупности в электрических и магнитных полях, а также по разработке теории этих процессов, созданию новых типов сепараторов и промышленному внедрению последних велись в ИГД им. А.А.Скочинского.

**Химические методы переработки.** В технологии обогащения полезных ископаемых все шире используют комбинированные схемы, в которых наряду с общепринятыми операциями физического разделения минеральных зерен применяют химические методы, обеспечивающие обработку сложных руд и упорных промежуточных продуктов. Внедрение таких методов обусловлено трудностями обогащения типов руд, характеризующихся комплексностью состава, тон-

ким взаимопроращением минеральных компонентов, способностью к шламованию, невысоким содержанием разделяемых минералов или сходством их физико-химических свойств.

Химические методы, применяемые в сочетании с методами и операциями механического обогащения или взамен их для достижения более высоких показателей при обработке труднообогатимых руд, составляют специфическую область технологии минерального сырья – **химическое обогащение**, включающее в себя две группы различных по своему назначению процессов, которые органически связаны с общей технологической схемой.

К первой группе относятся процессы избирательного растворения или химического превращения части входящих в состав руды минералов для отделения компонентов пустой породы, вредных примесей, а иногда и некоторых ценных элементов от ценных компонентов, остающихся в неизменной минеральной форме. Такие процессы применяют с теми же целями, что и методы механического обогащения, поэтому по аналогии с последними названы процессами химической селекции минералов.

Ко второй группе относятся процессы переработки упорных промежуточных продуктов обогащения и низкосортных концентратов, которые не могут быть эффективно доработаны механическими методами или непосредственно использованы заводами, перерабатывающими соответствующие кондиционные концентраты. Многие предприятия испытывают необходимость в таких процессах переработки многолетних спецотвалов или запасов бедных забалансовых руд.

Химическая селекция минералов с регенерацией реагентов начинает успешно применяться для переработки некоторых труднообогатимых черных, цветных, редких металлов и неметаллических полезных ископаемых (например, руд железа, вольфрама, ниобия, золота, марганца, фосфора и др.). Она эффективна в тех случаях, когда механическое обогащение не обеспечивает получения кондиционных концентратов или достаточно высокой степени извлечения полезного компонента. Перспективно применение химической селекции совместно с операциями механического обогащения руд. Высвобождение зерен ценных минералов при избирательном растворении или термическом разложении пустой породы часто способствует более полному их извлечению и облегчает получение богатых концентратов при последующем механическом обогащении.

Сырье и продукция при химической переработке упорных промпродуктов, низкосортных, некондиционных и нестандартных концентратов отличаются по своим характеристикам от получаемых при переработке кондиционных концентратов. Так, при химической переработке товарным продуктом может быть химический концентрат, подлежащий дальнейшей переработке (подобно кондиционным концентратам механического обогащения), или чистое химическое соединение. К настоящему времени создан целый ряд эффективных технологий

извлечения полезных компонентов из минерального сырья и продуктов его переработки с применением химических методов.

**Биохимические (бактериальные, микробиологические) методы** успешно применяют в технологии обогащения и гидрометаллургической переработки руд и концентратов, содержащих медь, цинк, молибден, уран, марганец, железо и другие металлы. Бактериальное выщелачивание широко используют для кучного выщелачивания меди из бедных руд (Канада, США, Япония, Югославия). Разработано несколько вариантов кучного выщелачивания золота, в частности, с разделением стадии микробиологического синтеза золотосодержащих соединений и последующего выщелачивания. В России и США ведутся работы по использованию гетеротрофных микроорганизмов для выщелачивания меди, титана, урана при высоких значениях рН.

В 1970 г. П. Брукс, К. Дин и Ж. Розенбаум предложили способы извлечения ценных компонентов из силикатных и карбонатных морских конкреций, представляющих значительный источник марганца, никеля, кобальта, меди и других металлов. Конкреции широко распространены на глубине от 100 до 7 тыс. м на дне Атлантического и Тихого океанов, а также некоторых озер.

Химические методы извлечения полезных компонентов по схеме выщелачивания – осаждение благодаря простоте аппаратного оформления и обслуживания, а также стабильности получаемых результатов успешно применяют на многих предприятиях алюминиевой, золотодобывающей и урановой промышленности, на обогатительных предприятиях при переработке труднодоступных промпродуктов.

**Современные проблемы обогащения полезных ископаемых.** Развитие техники и технологии обогащения полезных ископаемых за последние 50 лет предопределило значительные достижения отечественной фундаментальной науки в области познания основных явлений и закономерностей при разделении минеральных комплексов, что позволило создать высокоэффективные процессы и технологии для первичной переработки углей и руд сложного вещественного состава и обеспечить промышленность необходимой номенклатурой и качеством концентратов.

В современных условиях при необходимости комплексного извлечения из недр различных полезных компонентов, введения в эксплуатацию месторождений с менее ценными по содержанию полезных компонентов углями, рудами и другими видами минерального сырья, а также при необходимости использования в народном хозяйстве отходов переработки резко возрастает число **актуальных научных проблем** в этом направлении, к которым можно отнести разработки:

– программно-аппаратного комплекса проведением экспрессной минералого-технологической оценки природных и техногенных месторождений на основе имидж-анализа и выдачей прогнозной технологии комплексной переработки руд и углей;

- системы управления качеством добываемых углей и руд, обеспечивающей устойчивость процессов и экологическую безопасность их обогащения;
- системы физико-технических и химических методов разделения минералов при комплексной и экологически чистой переработке твердых полезных ископаемых;
- новых методов и технических средств эффективного обогащения забалансовых, в том числе окисленных руд черных и цветных металлов, высокозольных углей и др.;
- научных основ каталитических методов воздействия на процессы комплексной переработки горючих сланцев;
- теории процессов обогащения химическими, ядерно-физическими, нейтронно-активационными, люминесцентными, фотометрическими, магнетогидродинамическими и другими методами;
- новых экологически безопасных реагентов и методов обработки пульпы для оптимизации флотационных и гидрометаллургических процессов;
- новых обогатительно-металлургических методов обработки и переработки труднообогатимых руд и сырья из техногенных образований (в первую очередь упорных золотосодержащих, оловосодержащих и полиметаллических руд) на основе комбинирования эффективных методов обогащения с пиро- и гидрометаллургическими процессами;
- технологии и техники переработки мышьякосодержащих соединений, платиносодержащих, медесодержащих, свинцово-цинковых и других экологически опасных сложных руд и вторичного сырья;
- методов и технических средств переработки отходов обогащения углей и руд с превращением их в товарный продукт для использования в народном хозяйстве,
- физико-технических основ и технологических схем комплексного безотходного использования и переработки бокситов, нефелинов и другого отечественного алюминиевого сырья для производства глинозема, карбонатных марганцевых руд (Иркутская обл., Мордовия, Урал) для частичной компенсации дефицита марганца в России;
- методов и технических средств удаления серосодержащих и фосфоросодержащих минералов и использования нетоксичных добавок и вяжущих для упрочнения пород, применяемых в строительстве;
- новых эффективных методов и технологии глубокого обогащения углей и тонкодисперсных минеральных систем;
- новых физико-технических и химических процессов измельчения руд и разделения минералов с целью создания оборудования большой производительности;
- новых процессов и аппаратов для избирательного изменения технологических свойств минералов на основе энергетических воздействий с целью значительного (1,3–1,8 раз) снижения энергозатрат на измельчение и вовлечения в переработку руд сложного вещественного состава.

## Список литературы к разделу 5.5

1. *Абрамов А.А.* Флотационные методы обогащения. – М.: Недра, 1993.
2. *Абрамов А.А., Леонов С.Б.* Обогащение руд цветных металлов. – М.: Недра, 1982.
3. *Авдохин В.М., Абрамов А.А.* Окисление сульфидных минералов в процессах обогащения. – М.: Недра, 1989.
4. *Богданов О.С., Максимов Л.И., Поднек А.К.* Теория и технология флотации руд. – М.: Недра, 1980.
5. *Бочаров В.А., Рыскин М.Я.* Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов. – М.: Недра, 1993.
6. *Глембоцкий В.А., Классен В.И.* Флотационные методы обогащения. – М.: Недра, 1981.
7. *Глембоцкая Т.В.* Возникновение и развитие флотации. – М.: Наука, 1984.
8. *Гольман А.М.* Ионная флотация. – М.: Наука, 1982.
9. *Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулее Н.Н.* Микрофлотация. – М.: Химия, 1986.
10. *Кармазин В.И.* Технология обогащения руд черных металлов. – М.: Недра, 1982.
11. *Кармазин В.И., Кармазин В.В.* Магнитные методы обогащения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984.
12. *Козин В.З.* Опробование и контроль технологических процессов обогащения. – М.: Недра, 1985.
13. *Конев В.А.* Флотация сульфидов. – М.: Недра, 1985.
14. *Масляницкий Н.Н., Беликов В.В.* Химические процессы в технологии переработки труднообогатимых руд. – М.: Недра, 1986.
15. Методы исследования флотационного процесса / *В.И. Мелик-Гайказян [и др.]*. – М.: Недра, 1990.
16. *Мещеряков Н.Ф.* Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины. – М.: Недра, 1990.
17. Комбинированные процессы переработки руд цветных металлов / *С.Ж. Митрофанов [и др.]*. – М.: Недра, 1984.
18. Шейная сепарация и колонная флотация / *Ю.Б. Рубинштейн [и др.]*. – М.: Недра, 1989.
19. *Полькин С.М., Адамов Э.В., Панин В.В.* Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. – М.: Недра, 1982.
20. Справочник по обогащению руд: в 4 т. / под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1980–1984. – Т. 1–4.
21. Справочник по обогащению углей. – М.: Недра, 1984.
22. *Тихонов О.М.* Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984.

23. Чантурия В.А., Лунин В.Д. Электрохимические методы интенсификации процесса флотации. – М.: Наука, 1983.
24. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации. – М.: Наука, 1993.
25. Черняк А.С. Химическое обогащение руд. – М.: Недра, 1987.
26. Шохин В.Н., Лопатин А.Ф. Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980.
27. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: учеб. – М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2005. – 669 с.

### **5.6. Физические и химические процессы извлечения полезных компонентов из природных и техногенных вод**

**Физические и химические процессы извлечения полезных компонентов из природных и техногенных вод – это наука о методах и средствах извлечения полезных компонентов из природных и техногенных вод при помощи физических и химических воздействий.** Она включает в себя учения о химическом равновесии, растворах, фазовых переходах, процессах на границе раздела фаз, а также охватывает процессы получения твердых фаз химических элементов, металлов, минеральных солей и органических соединений из природных и техногенных вод без изменения их химического состава и свойств.

**Объектом изучения данной науки являются** промышленные, сточные, рудничные, шахтные, карьерные воды; высокоминерализованные воды природных источников и Мирового океана.

**Предмет науки –** изучение термодинамического равновесия, протекания фазовых превращений и закономерностей распределения полезных компонентов в продуктах разделительного массопереноса при физических, химических и биохимических методах воздействия на минерализованные водные системы.

**Структура науки и основные научные направления** включают в себя:

– извлечение грубодисперсных компонентов, находящихся в виде твердых взвесей, физическими методами в гравитационных полях (отстойники, сгустители), центробежных полях (гидроциклоны, центрифуги) и путем вакуумной фильтрации с применением флокулянтов;

– извлечение тонких и сверхтонких минеральных взвесей физико-химическими методами с применением электрофлотации в сочетании с флокуляцией или электрокоагуляцией;

– извлечение из водных растворов химических элементов, металлов, минеральных солей, ионов и молекул органических соединений физико-химическими, химическими и биохимическими методами.

Извлечение химических элементов и минеральных солей осуществляют:

– гомогенным или гетерогенным ионным обменом с применением специальных веществ (сорбентов, ионитов);

- переводом компонента из одной жидкой фазы в другую (экстракция); вытеснением более электроположительными компонентами (цементация);
- химическим осаждением с применением реагентов и последующим механическим отделением осадков фильтрованием или центрифугированием;
- электролитическими методами с выделением металлов на катоде;
- методом обратного осмоса с применением фильтрующих селективных мембран;
- электросмотическими методами.

Для извлечения из водных растворов ионов и молекул органических соединений используют методы флотации, основанные на различиях физико-химических свойств компонентов: вакуумную; компрессионную; химическую или газовую; электрофлотацию; ионную; пенное фракционирование; флотацию гидрофобных осадков; флотоэкстракцию. При этом извлекаемые соединения закрепляются на выделяющихся пузырьках газов и всплывают вместе с ними на поверхность.

Наука о физических и химических процессах извлечения компонентов из природных и техногенных вод обеспечивает повышение комплексности использования и рост экономической эффективности переработки минерального сырья и высокоминерализованных вод. Она тесно связана со смежными науками: общей, органической и физической химией; электрохимией; биохимией; гидрологией и гидрогеологией; геотехнологией; горным делом.

Обогащительные фабрики ежегодно направляют в хвостохранилища и очистные сооружения до 10 км<sup>3</sup> твердых и жидких отходов. Со сточными водами за год сбрасывается до 17,8 Мт растворенных веществ по сухому остатку, в том числе: 8 Мт – хлоридов; 5,4 Мт – сульфатов; 0,126 Мт – нитратов. Анализ солевого сброса показал, что 17,8 км<sup>3</sup> природных вод содержат солей более 1 г/л и, следовательно, уже не относятся к категории пресных.

Поступление в год других биогенов составляет: по углероду – 0,8 Мт, общему азоту – 96,6 кт, общему фосфору – 60 кт. Распределение загрязняющих компонентов по содержанию (кт/год) следующее: таниды – 285; железо – 51; нефтепродукты, масла, жиры – около 40; алюминий – 12,5; СПАВ – около 9. Сброс тяжелых металлов составил (кт/год): Zn – 1,6; Си – 0,93; Сг – 0,8; Ni – 0,6; РЬ – 0,2; Мп – 0,1.

Главными источниками загрязнения биосферы соединениями тяжелых металлов, серы, фосфора, мышьяка являются обогатительные, металлургические и металлообрабатывающие предприятия. На обогатительных фабриках образуются следующие виды производственных сточных вод:

- технологические хвосты – твердые и жидкие отходы непосредственно процесса обогащения;
- сливы и фильтрат от сгущения и обезвоживания концентратов – жидкие отходы вспомогательных процессов обогащения;
- смывные стоки – стоки смыва полов и стен, после охлаждения масел, подшипников, компрессоров, гидрообеспыливания и др.;

– стоки мокрой газоочистки – сточные воды после мокрой очистки отходящих дымовых газов в скрубберах.

Объединенный поток сточных вод всех категорий образует отвальные хвосты. Объемы водопотребления и сброса сточных вод, солевой и ионный составы сточных вод обогатительных, особенно флотационных, фабрик определяются химическим составом перерабатываемых руд и продуктами реакций, протекающих во флотационной пульпе в результате взаимодействия вводимых флотационных реагентов с минералами руды и ионами жидкой фазы пульпы. Все это обуславливает формирование достаточно многокомпонентных растворов.

По составу производственные сточные воды можно разделить на два вида: с высоким содержанием взвешенных веществ и относительно низкой концентрацией растворенных солей и ионов; с высоким содержанием растворенных солей и низкой концентрацией взвешенных веществ.

К первому – относятся технологические хвосты флотации и отвальные хвосты, в которых содержание взвешенных веществ составляет 10–20 %. Летучая часть минеральной взвеси не превышает 2 % и представляет собой флотореагенты, адсорбированные на поверхности частиц, и остатки органических примесей, содержащихся в рудах. Плотный остаток этих сточных вод представлен водорастворимыми солями минералов руд, органическая часть загрязнений составляет остаточные флотореагенты флотации.

Ко второму виду относятся сливы сгустителей и фильтрат вакуум-фильтров, основными загрязнителями которых являются растворенные соли, являющиеся остатками коагулянтов, использованных в процессах сгущения и обезвоживания концентратов. Содержание взвешенных веществ, как правило, небольшое. Следует отметить высокое содержание основных минералов в осадке этих вод, которые являются потерями технологического процесса.

Содержащиеся в сточных водах полезные компоненты являются вторичным сырьем для предприятий металлургической и химической промышленности. Использование их в значительной мере снижает себестоимость очистки, так что в некоторых случаях процессы очистки сточных вод становятся самоокупаемыми.

Новое направление – извлечение полезных компонентов из природных вод. В одних случаях утилизация ценных компонентов связана с водоочисткой природных вод, поступающих в промышленное или бытовое водопользование, в других – с промышленной переработкой высокоминерализованных вод (источников, озер, океанов), содержащих в значительных количествах драгоценные, редкие и радиоактивные металлы, а также иные дефицитные вещества.

#### 5.6.1. Процессы очистки вод и извлечения полезных компонентов

Обычно методы очистки воды и извлечения из нее полезных компонентов разделяют на группы исходя из сущности используемых процессов. Как правило, выделяют три группы методов:

– механические, основанные на использовании практически лишь двух характеристик – большей относительно воды плотности загрязняющих ее компонентов и больших относительно молекул воды размеров агрегатов этих компонентов;

– физико-химические, использующие значительно большее число характеристик (гидрофобность, электрофизические, электрохимические и магнитные свойства, растворимость, адсорбционная способность);

– химические, основанные на способности ионно-молекулярных компонентов к образованию фазообразующих химических соединений, легко удаляемых из воды.

Однако используемые в настоящее время процессы являются, как правило, комбинированными, и входящие в них субпроцессы могут относиться ко всем трем группам. В частности, процессы ультра- и гиперfiltrации по внешним признакам должны быть отнесены к механическим, однако из-за существенного влияния электрофизических и других физико-химических свойств мицелл, молекул и ионов их относят к физико-химическим методам. Процесс электрокоагуляции также относится к физико-химическим методам, хотя образование флокулов происходит преимущественно вследствие химических процессов гидратообразования. Наконец, такой процесс, как химическое осаждение, включает в себя физико-химическую стадию (коагуляцию) и механическую стадию (filtrование).

Учитывая, что процессы водоочистки и утилизации ценных компонентов существенно различаются по сложности, целесообразно выделить главные стадии, на которые следует разделить каждый процесс, и систематизировать используемые физико-химические субпроцессы.

1. Стадия перевода компонентов в извлекаемую форму, связанная с изменением агрегатного или фазового состояния.

2. Стадия агрегирования, концентрирования компонента в микрообъеме очищаемой жидкости или на временном носителе и извлечения носителя из воды.

3. Стадия извлечения компонента из микрообъема жидкости или из временного носителя.

С позиции эффективности водоочистки определяющими являются первая и вторая стадии. С позиции утилизации ценных компонентов очевидна важность третьей стадии, которая часто представляет собой сложный многоступенчатый процесс, начинающийся с операции удаления утилизируемого компонента с временного носителя в элюаты и заканчивающийся получением товарного продукта.

Научной основой разработки и совершенствования процессов, приводящих к фазовым или агрегатным превращениям извлекаемых компонентов, являются разделы физической химии, описывающие фазовые и химические равновесия в конденсированных системах. Параметры, по которым оценивается возмож-

ность перевода растворенных веществ в сконденсированную фазу, следующие: растворимость твердых и жидких веществ в жидкостях; кинетика кристаллизации и конденсации из растворов; термодинамическая вероятность протекания химических и электрохимических реакций; энергия активации и кинетика реакций.

Научной основой разработки и совершенствования процессов концентрирования извлекаемых примесей являются разделы физической химии, описывающие поверхностные явления и явления массопереноса в различных полях. Параметры, по которым оценивается возможность концентрации извлекаемых компонентов в микрообъемах очищаемой жидкости или вводимого в нее носителя, следующие: теплота смачивания; поверхностное натяжение на межфазных границах; энергия адсорбции на поверхности твердых тел и абсорбции в жидких фазах; скорости движения ионов; константы диффузии.

Научной основой разработки и совершенствования процессов извлечения примесей являются разделы физической химии и механики, описывающие седиментационные и фильтрационные явления в гетерогенных системах. Параметрами, по которым оценивается возможность извлечения из очищаемых вод сконденсированных примесей (или очищенной жидкости), являются: дисперсность, заряд и электрокинетические константы частиц; вязкость суспензий и эмульсий; гидрофобность поверхности частиц; энергия сольватации.

Наряду с перечисленными существует большое количество физико-химических параметров, не относящихся к компонентам рассматриваемой системы, однако оказывающих существенное влияние на результаты. Это – ионная сила и электропроводность растворов, перенапряжение и поляризация электродных процессов, дисперсность газовой фазы, гидродинамические характеристики зоны разделения.

Процессы удаления из вод грубо- и среднедиспергированных примесей относятся к наиболее простым. Они известны с момента зарождения техники и обусловлены потребностью в осветленной воде.

**Метод отстаивания**, как основная или вспомогательная операция, применялся и применяется практически во всех схемах очистки сточных вод. Осветление сточных вод происходит в результате осаждения или всплывания грубо- и среднедисперсных примесей соответственно с большей или меньшей плотностью, чем у воды. Результаты процесса определяются дисперсностью и агрегативной устойчивостью загрязняющих компонентов, вязкостью жидкой фазы и гидродинамическими условиями осаждения (всплытия). Интенсификации процесса осветления способствует физико-химическое модифицирование суспензий и эмульсий, обеспечивающее увеличение размеров зерен и капель, уменьшение их стабильности. Эффективным методом интенсификации является введение в осветляемую воду поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Благодаря избирательной адсорбции и ориентации молекул ПАВ на поверхности раздела фаз в пульпе уменьшаются поверхностное и межфазное натяжения,

что приводит к изменению состояния частиц твердой фазы пульпы. Дисперсные и коллоидные частицы слипаются, образуя хлопья, которые легко отделяются от жидкой фазы. Свертывание частиц в хлопья происходит под действием процессов коагуляции и флокуляции.

**Коагуляция** вызывается взаимодействием разноименно заряженных частиц при введении в пульпу реагентов – электролитов. Притяжение частиц приводит к образованию хлопьев, что ускоряет их осаждение. Слипанию частиц способствует также действие молекулярных сил сцепления. В качестве реагентов-коагулянтов применяют известь, хлористый кальций, хлорное и хлористое железо, железный купорос, алюмокалиевые квасцы и др.

**Флокуляция** происходит при гидрофобизации поверхности частиц минералов реагентами-собирателями, благодаря чему снижается степень гидратированности поверхности твердых частиц, чем устраняется расклинивающее действие воды между частицами и усиливается их слипание. Флокуляцией называется также процесс образования хлопьев, частицы которых связаны за счет химических сил мостиками из макромолекул полимеров. При флокуляции образуются более прочные и крупные, чем при коагуляции, агрегаты, которые быстрее оседают или всплывают за счет уменьшения вязкостных составляющих сопротивления жидкости.

Улучшению осветления воды под воздействием реагентов способствует ее обработка ультразвуком и подогрев паром. Положительный эффект при этом обусловлен снижением вязкостных составляющих силы сопротивления движению частиц или капель в воде.

Разновидностью процесса отстаивания является процесс **центробежного осветления**, осуществляемый в гидроциклонах и осадительных центрифугах. Центробежное осветление характеризуется высокой эффективностью благодаря значительному (в 3–30 раз) росту скорости осаждения (или всплытия) удаляемых примесей. Однако эффективность использования ПАВ в гидроциклонах заметно снижается из-за разрушения флокул вследствие появления сдвиговых напряжений.

Процессы отстаивания и центробежного осветления являются неселективными, однако в ряде случаев выделяемые (утилизуемые) фракции используются в качестве промпродуктов (в нефтехимии) или даже товарных концентратов (в обогащении полезных ископаемых).

**Процессы фильтрации** весьма широко используются в схемах очистки вод и утилизации извлекаемых веществ. Современный уровень развития технологии фильтрующих материалов позволяет получать абсолютно чистую воду, вплоть до удаления ионных компонентов.

Для очистки вод от взвешенных частиц применяют зернистые фильтры. В качестве фильтрующего материала используют гравий, щебень, мраморную крошку, кварцевый песок, керамзит, шпак или смеси указанных материалов. Часто применяют двухслойные и трехслойные фильтры с убывающей по направлению движения воды крупностью зернистого материала (до 0,8 мм).

Для выделения из сточных и природных вод мелкодиспергированных примесей применяют микрофильтры, основные рабочие элементы которых – микросетка с ячейками размером от единиц до десятков микрометров, ткань, волокнистая металлическая или синтетическая матрица, пористая керамика или металлокерамика. С целью улучшения характеристик фильтров, в частности уменьшения зарастания, выпускают керамические фильтры с модифицированной поверхностью. Высокими эксплуатационными характеристиками обладают микрофильтры из фторопласта. Зернистые фильтры и микрофильтры обеспечивают удаление из воды до 95 % всех взвешенных примесей, в том числе нефтепродуктов, масел, жиров.

Эффективность очистки возрастает при использовании коагулянтов, флокулянтов, а также ультразвуковой обработки.

Макро- и микрофильтрация, заканчивающаяся получением частично очищенной воды и смывов с фильтров с содержанием 5–20 % твердых и маслообразных включений, в ряде случаев (нефтепереработка, обогащение полезных ископаемых, металлообработка) позволяет утилизировать находящиеся в загрязненной воде ценные компоненты в виде промпродуктов (водомасляной эмульсии, металлургических и химических концентратов и т.д.), направляемых на дальнейшую переработку.

**Процессы удаления из вод тонко- и ультратонкодисперсных примесей.** Наибольшие проблемы возникают при наличии в очищаемой воде твердых и жидких включений размером от целых до сотых долей микрометра. Традиционным путем их решения было использование процессов флокуляции и коагуляции для укрупнения размеров включений до десятых долей микрометра, после чего использовали обычные методы осветления – осаждение и фильтрацию.

Весьма важным с позиции утилизации находящихся в промышленных водах ценных компонентов является *процесс селективной флокуляции*, позволяющий за счет использования сочетаний реагентов достигать образования флоккул одного вещества (минерала), при том, что другие вещества остаются в диспергированном виде. Процессы селективной флокуляции широко применяют для повышения степени извлечения тонких фракций железных и марганцевых минералов, каменных углей. В качестве флокулянтов используют крахмалсодержащие продукты, полиакриламид, жирно-кислотный собиратель, в качестве дисперсантов – едкий натрий, известь, жидкое стекло.

Высокая эффективность очистки сточных вод достигается при использовании в качестве флокулянтов отходов переработки хлопка, а также отходов сельскохозяйственной продукции и животноводства.

Успехи в развитии технологии фильтрующих материалов позволили разработать методы прямой фильтрации ультратонких и молекулярных примесей.

Универсальными методами очистки сточных и природных вод от грубо-, тонко- и гипертонкодиспергированных примесей являются различные *процессы флотации*, предполагающие насыщение очищаемой жидкости всплывающими

пузырьками воздуха и создание условий для закрепления на пузырьках загрязняющих примесей.

Флотация диспергированным воздухом предполагает первоначальную подачу газовой фазы в аэратор, а затем из аэратора в виде пузырьков размером до 3 мм – в очищаемую воду. При флотации растворенным воздухом пузырьки размером до 0,5 мм образуются непосредственно из воздуха, растворенного в очищаемой воде.

Электрофлотация предполагает насыщение очищаемой воды пузырьками газов, образующихся на электродах в результате электролиза воды. Размер пузырьков при электрофлотации составляет примерно 0,1 мм.

Из методов флотации диспергированным воздухом наибольшее распространение получили процессы пенной сепарации и колонной флотации. При пенной сепарации очищаемая вода подается сверху на специально подготовленный пенный слой, который задерживает гидрофобные частицы или капли загрязнений. При колонной флотации очищаемая вода аэрируется пузырьками воздуха, на которых закрепляются гидрофобные взвешенные компоненты, выносимые при всплывании пузырьков в пенный слой.

Ограниченное распространение получил метод напорной флотации, при котором насыщение воды воздухом происходит под действием гидростатического давления столба очищаемой жидкости на глубине 14–15 м, а выделение пузырьков воздуха по мере подъема очищаемой жидкости и уменьшения гидростатического давления.

Эффективность флотационного извлечения твердых и жидких загрязнений при их малых концентрациях и размерах возрастает при использовании процессов (предварительно или одновременно с флотацией) коагуляции и флокуляции.

**Процессы удаления из вод и утилизации ионных и молекулярных компонентов.** Очистка природных и сточных вод от ионных и молекулярных примесей первоначально была направлена на получение питьевой воды, доизвлечение драгоценных металлов из стоков ювелирного производства и удаление ядовитых металлов (ртути) из карьерных вод. Промышленная революция обусловила развитие процессов металлургии и металлообработки, переработки нефти, что, в свою очередь, вызвало необходимость очистки сточных вод от катионов тяжелых металлов, нефтепродуктов и ПАВ. С этого времени начинается развитие процессов удаления из вод ионных и молекулярных примесей.

Ионные и молекулярные примеси удаляют из сточных и природных вод методами, которые разделяются на две группы:

– к первой относятся методы, в которых ионные и молекулярные компоненты переводят в конденсированное состояние, а затем извлекают одним из ранее рассмотренных способов;

– ко второй – методы, в которых ионные и молекулярные компоненты предварительно концентрируют в ограниченных объемах, а затем извлекают

в чистом виде или в виде промпродуктов с использованием процессов, сопровождающихся фазообразованием.

Главное отличие методов заключается в наличии стадии концентрирования извлекаемого компонента.

Процессы *ионной флотации* характеризуются как непосредственным концентрированием извлекаемых ионных компонентов в приповерхностном слое всплывающих пузырьков воздуха, так и концентрированием после осаждения в виде конденсированных фаз.

Одним из важнейших методов концентрирования компонентов, извлекаемых из сточных и природных вод, является *процесс сорбции*. В общем случае под процессом сорбции понимают совокупность процессов перехода из объема раствора на межфазную границу твердое – жидкое или жидкое – жидкое ионных и молекулярных компонентов.

Следует выделить главные сорбционные процессы, широко используемые в промышленности.

Процесс сорбции активированным углем и органическими сорбентами универсален и используется для извлечения из вод катионов тяжелых металлов, органических соединений и других веществ. Активированный уголь применяют также для извлечения из сточных вод катионов и комплексов тяжелых цветных металлов, в том числе золота и серебра. Утилизацию извлеченных активированным углем металлов обычно проводят подмешиванием угля в шихту металлургического процесса.

Более эффективен метод утилизации, заключающийся в десорбции с поверхности угля адсорбированных соединений и регенерации исходных свойств. В случае очистки воды от ПАВ десорбцию адсорбированных соединений проводят низкокипящими органическими растворителями, а в случае очистки от металлов – минеральными кислотами или комплексообразователями.

Несмотря на давнюю известность процесса сорбции на активированных углях, число исследований в этой области велико. Основная цель их – повышение устойчивости угля во время регенерации, а также повышение его сорбционной емкости и замена более дешевыми сорбентами. Так, в последние годы разработана технология производства и использования активированных углеродных волокон в качестве сорбентов для ионов металлов, а также фильтрующие сорбенты на основе торфа для очистки сточных вод от нефтепродуктов. Насыщенный сорбент представляет собой хорошее топливо.

Сорбция неорганическими сорбентами получила меньшее распространение в основном из-за невысокой емкости по отношению к улавливаемым компонентам. В качестве сорбентов используются силикагель, природные и искусственные цеолиты, туфы, бентонитовые глины, диатомиты, вермикулиты, глаукониты и т.д. В ряде случаев возможно применение различных отходов – шлаков, золы. Существенный недостаток неорганических сорбентов – низкая регенерационная способность.

Интенсивным направлением исследований в области разработки новых эффективных технологий очистки вод является поиск новых сорбентов.

Относительно новым направлением водоочистки является *процесс экстракции*, при котором, в отличие от процесса сорбции, органические и неорганические загрязнения концентрируются непосредственно в объеме экстрагента, что заметно повышает его емкость. Фактор, сдерживающий применение экстрагентов в гидрометаллургии, – их высокая растворимость в воде, однако поиск новых экстрагентов с малой растворимостью в воде дал положительный результат. Разработана технология извлечения тяжелых металлов из шахтных вод при помощи жидких экстракционных мембран.

Так же как и экстракция, из гидрометаллургии в водоочистку пришли *процессы ионного обмена*, получающие в настоящее время все большее распространение. Метод ионного обмена позволяет, с одной стороны, очищать воду до требований ПДК, с другой – селективно выделять отдельные компоненты растворов, облегчая их утилизацию. Применяемые для ионного обмена вещества (иониты) обеспечивают извлечение практически любых ионных компонентов сточных и природных вод. Молекулярные компоненты в ряде случаев могут быть удалены ионным обменом после подкисления или подщелачивания очищаемой жидкости. Недостаток процесса – высокая стоимость ионообменных смол и необходимость использования реагентов для элюирования (очистки) смол после их насыщения.

В значительной мере недостатков ионообменного метода очистки лишены *электродиализные методы*, основанные на явлении переноса ионов примесей через селективные ионообменные мембраны под действие электрического тока. Мембраны представляют собой пленки из синтетических полимеров, содержащие ионообменные активные группы, диссоциирующие в воде. Катионные мембраны проницаемы для катионов, анионные – для анионов, биполярные – для тех и других. При чередовании в межэлектродном пространстве катионных и анионных мембран образуются концентрирующие камеры, в которых собираются загрязняющие примеси, и обессоливающие камеры, из которых сливается очищенная вода. Область применения – очистка концентрированных металлосодержащих стоков цветной и черной металлургии, металлообработки, обессоливание сточных и природных вод.

Рассмотренные выше методы (сорбция, экстракция, ионный обмен, электродиализ) обеспечивают концентрирование примесей в микрообъемах очищаемых жидкостей или на временных носителях и получение очищенной воды, но не обеспечивают утилизации ценных компонентов.

Методы, рассмотренные далее, являются либо заключительной ступенью, либо самостоятельными процессами водоочистки и утилизации ценных компонентов.

Эффективным методом перевода ионных и молекулярных компонентов в конденсированную фазу и удаления их из очищаемой воды является *электро-*

*лиз растворов*, при котором протекают процессы катодного восстановления, анодного окисления, электрофореза коллоидных частиц, электрокоагуляции, электрофлотации. Катодное восстановление катионов металлов обеспечивает образование металлической фазы на катоде или вблизи катода (катодный шлам).

Сочетание электрофореза коллоидных частиц с электрофлотацией обеспечивает при электролизе удаление из очищаемой воды органических загрязнений. При получении анода из железа, алюминия протекает интенсивная анодная электрокоагуляция диспергированных и растворенных примесей гидроксидами соответствующего металла, образующимися при электрохимическом растворении анодов. Сочетание при электролизе прикатодной электрокоагуляции с электрофлотацией обеспечивает удаление невосстанавливаемых катионов металлов.

Область применения электролиза растворов – очистка металлосодержащих стоков горно-обогатительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий; очистка от нефтепродуктов и ПАВ стоков нефтяной и химической промышленности; очистка сложных по составу кожевенных, текстильных, пищевых и сельскохозяйственных объектов. Высокой эффективностью обладают электрохимические методы удаления загрязнений и утилизации ценных компонентов из концентрированных микрообъемов очищаемых стоков или из продуктов регенерации сорбентов и ионообменных смол.

Основные направления исследований электрохимической очистки сточных вод – подбор материалов для анодов и катодов и поддержание условий электролиза, обеспечивающих максимальный выход по току реакций с участием загрязняющих компонентов. Другим эффективным направлением является регулирование процессов массопереноса внутри аппаратов путем установки диафрагм и мембран, предотвращающих релаксационные процессы и повышающих устойчивость рабочих электродов к разрушению и отравлению.

Традиционно для перевода ионно-молекулярных примесей в конденсированные фазы применяют *процессы химической очистки*, предполагающие воздействие реагентов-осадителей, окислителей и восстановителей.

Процесс химического осаждения сводится к связыванию ионов примесей в малодиссоциирующие и малорастворимые соединения. Существенный недостаток процессов химической очистки с использованием реагентов-осадителей – увеличение засоленности очищенных вод.

В ряде случаев вышеназванного недостатка лишены методы, основанные на применении реагентов-окислителей. Использование газообразного хлора и гипохлорита эффективно для разрушения комплексных соединений тяжелых металлов, в частности цианидных и роданидных, с последующим осаждением гидроксидов и окислительным разрушением цианидных и роданидных ионов до углекислого газа и азота или до промежуточных соединений. Недостаток методов с использованием соединений хлора – образование ядовитых соединений и утечка газообразного хлора. Более безопасны методы, предполагающие ис-

пользование в качестве окислителя озона, кислорода или перекиси водорода. Недостаток этих методов – низкая кинетика окислительных процессов и высокая стоимость используемых реагентов.

Перспективы окислительного метода связаны с развитием каталитических, фотохимических и электрохимических методов интенсификации, предполагающих активирование окислительно-восстановительных реакций неорганическими и органическими катализаторами, различными видами облучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного спектров), радиочастотным воздействием, электрическими разрядами и т.д. Преимущество метода – совмещение процессов очистки и санации воды.

Процессы химической и окислительной обработки завершаются процессами механической, сорбционной, флотационной или другой очистки сточных вод от сконденсированных примесей. В ряде случаев полученные осадки представляют собой ценное металлургическое сырье, химические удобрения и т.д.

Научные исследования в области повышения эффективности химической очистки направлены на поиск новых осадителей, в том числе селективного действия и интенсификации окислительно-восстановительных процессов.

Интенсификация методов окислительной очистки с помощью микроорганизмов (бактерий, водорослей) получила быстрое развитие и выросла в самостоятельное направление, характеризующееся высокой эффективностью и универсальностью. **Биологические методы очистки** основаны на способности микроорганизмов включать находящиеся в ионной и молекулярной форме примеси в процессы жизнедеятельности и в виде нерастворимых продуктов метаболизма или составных частей собственного организма выводить из очищаемой воды.

Процессы биологической очистки получили распространение при обработке стоков горно-обогатительных и металлургических предприятий для удаления органических флотореагентов, цианида ионов тяжелых металлов. При очистке сточных вод от органических реагентов и цианида последние являются источником легко усваиваемых углерода и азота, необходимых для роста массы микроорганизмов. Ионы тяжелых металлов осаждаются сероводородом, выделяющимся при жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий или адсорбируются различной микрофлорой и микрофауной.

При биосорбции сначала образуются комплексы металлов с карбоксильными и аминными группами клеточной оболочки, затем выделяются гидроокиси или восстановленные металлы, адсорбируемые в виде коллоидных частиц на поверхности клетки.

Недостатками микробиологических методов очистки являются низкая интенсивность процессов водоочистки и трудность утилизации содержащихся в загрязненной воде ценных примесей. Вследствие этого биохимические методы применяют для окончательной доочистки сточных вод с целью доведения их до требований ПДК или вовлечения в водооборот. Утилизация ценных компонен-

тов становится возможной при ведении биохимической очистки в колонных аппаратах кипящего слоя. После насыщения гранулированные водоросли сжигают и из золы извлекают тяжелые и редкие металлы.

В последние годы происходило интенсивное развитие биологических методов. Главные направления научных исследований и совершенствования технологии – поиск новых высокоемких биосорбентов и активных микроорганизмов, интенсификация их деятельности, разработка технологии утилизации ценных компонентов.

Относительно эффективным методом утилизации выделенных из оборотных вод концентрированных растворов, содержащих трудновыделяемые примеси, является процесс *термической обработки* сточных вод, заключающийся в контактном или бесконтактном нагреве и испарении воды и улавливании содержащихся в ней примесей. Для регенерации тепла используют котлы-регенераторы, коэффициент полезного действия которых составляет 50–60 %. Метод термической обработки позволяет проводить обессоливание воды, однако его использование для очистки обычных промстоков недостаточно эффективно из-за значительных энергозатрат.

#### 5.6.2. Системы замкнутого водооборота горно-металлургических предприятий

Развитие систем развитого водооборота связано, с одной стороны, с ужесточением требований к составу вод, сбрасываемых в объекты природопользования, и, с другой стороны, с оскудением природных источников, используемых для водоснабжения промышленных предприятий.

Стоки горных и металлургических предприятий характеризуются прежде всего повышенным содержанием цветных и редких металлов и относительно небольшим содержанием поверхностно-активных веществ. Однако общее содержание может значительно отличаться и составлять от 0,01–0,1 г-экв/л (хвосты гравитационного обогащения, рудничные воды) до 1–10 г-экв/л (сливы сгустителей, стоки электролизных ванн, чанов выщелачивания и т.д. Задачей процессов водоочистки при организации замкнутых схем водооборота является поддержание такого ионно-молекулярного и дисперсионного состава оборотных вод, при котором не происходит ухудшение технологического процесса и снижение технико-экономических показателей обогащения.

В первую очередь частичный или полный водооборот получил распространение на углеобогатительных и рудообогатительных фабриках, расположенных в местностях с недостатком водных ресурсов (обогатительные фабрики Средней Азии, Казахстана) или с высокой концентрацией иных объектов водопользования (обогатительные фабрики Украины, Черноземья, Урала). В настоящее время практически все обогатительные фабрики используют лишь частичный водооборот (от 5 до 85 %), что обусловлено необходимостью использования чистой воды в отдельных операциях технологического процесса (измельчение руды,

приготовление реагентов), а также невозможными потерями вследствие дренажа и высыхания воды из хвостохранилищ и очистных сооружений.

Переход на полный водооборот или сокращение расхода чистой воды при частичном водообороте требует разработки эффективных методов кондиционирования оборотных вод с целью придания им свойств, не оказывающих отрицательного влияния на ход технологического процесса. С другой стороны, важным направлением исследовательских и проектных работ является разработка эффективной схемы водооборота.

**Схема поциклового водооборота** предполагает возврат очищенных стоков в тот же передел, отходом которого они являлись. Преимущества поциклового водооборота заключаются в возможности повторного использования полезных компонентов (как перерабатываемого сырья, так и используемых реагентов) и ограниченности параметров оборотной воды, требующих корректировки. Недостатки – быстрое накопление индифферентных к очистке примесей, нестабильность схемы при наличии резких колебаний технологического процесса.

**Схема поцехового водооборота** предусматривает объединение стоков нескольких переделов и их переработку по одной схеме. Предполагается, что объединяемые продукты близки по своему составу, а очищенная оборотная вода пригодна для использования во всех переделах. Преимущества поцехового водооборота заключаются в его большей устойчивости и возможности использования более производительного оборудования. Недостатки – усреднение концентрации примесей и сокращение возможностей повторного использования содержащихся в стоках реагентов.

Весьма часто используется **схема общего водооборота**, при котором в очистные сооружения направляются отходы как смежных, так и не связанных между собой производств. Положительные стороны такой схемы – значительное снижение общего и частного соленакопления, применение синергических процессов взаимоочистки, возможность использования высокопроизводительного оборудования. Основные недостатки – усложнение ионно-молекулярного состава и снижение концентраций отдельных компонентов.

Наиболее перспективными являются **схемы общего водооборота со ступенчатой водоочисткой**, построение которых предусматривает организацию ступеней очистки стоков после отдельных циклов и переделов, объединение частично очищенных сливов для совместной очистки и доочистку отдельных потоков общего слива в соответствии с требованиями технологического процесса, куда каждый поток направляется.

Рассмотренные схемы применяют для производств, характеризующихся значительным количеством различных переделов и находящихся вблизи предприятий аналогичного или иного профиля.

Ступенчатая водоочистка обеспечивает возможность эффективной утилизации извлекаемых ценных компонентов путем их направления в предшествующие технологические операции или переработки в отдельном цикле. Объе-

динение частично очищенных стоков позволяет использовать эффекты взаимочистки и резко снижает эффект соленакопления, наблюдаемый при поцикловом и поцевом водооборотах.

Главными направлениями исследований при разработке замкнутых схем водооборота являются:

- разработка системы критериев к технологической воде после ее кондиционирования;
- оценка предельного соленакопления при замыкании схемы водооборота;
- поиск оптимальной структуры водооборота и водосброса.

Актуальным направлением исследований систем водооборота является изучение процессов сорбции и фильтрации компонентов сточных вод грунтами, находящимися в основании отстойников, шламонакопителей и хвостохранилищ и существенно определяющих состав дренажных вод вблизи вышеперечисленных гидротехнических сооружений.

Подлежащие очистке природные и сточные воды часто содержат в значительных количествах ценные компоненты. Это, в первую очередь, медь, цинк, свинец, золото, серебро, хром, никель, железо, уран, литий, бериллий, другие металлы; неорганические соединения, содержащие фосфор, бор и серу. Являясь вредными примесями в очищаемой воде, эти компоненты одновременно являются и ценное сырье для металлургической и химической промышленности. Современное состояние науки и техники позволяет проводить эффективную очистку сточных вод и утилизацию содержащихся в ней ценных компонентов. В ряде случаев стоимость утилизуемых сточных и природных вод полезных компонентов настолько велика, что позволяет полностью окупить затраты на водоочистку.

Главными направлениями в развитии методов извлечения полезных компонентов из сточных и природных вод являются:

- разработка научных основ технологии селективного извлечения ценных компонентов из сточных и природных вод с применением сорбционных, химических, электрохимических и мембранных методов;
- переход на безреагентные методы извлечения ценных компонентов или методы, сопровождающиеся минимальным насыщением очищенной воды солями (электрохимические, мембранные, флотационные);
- использование современных методов обогащения и гидрометаллургии (полиградиентная магнитная сепарация, ионная флотация, селективная флокуляция, баромембранная очистка, электрофорез) для эффективного извлечения ценных компонентов из очищаемых или перерабатываемых вод;
- разработка комбинированных процессов (сорбция – электродиализ, сорбция – флотация, сорбция – электролиз), позволяющих достичь высокой степени очистки воды при практически полной утилизации ценных компонентов;
- использование новых физических, физико-химических и биологических процессов для интенсификации выделения ценных компонентов (лучевая и волновая обработка, катализ, био- и фитосинтез);

– разработка технологически обоснованных систем критериев к оборотным водам в схемах замкнутого водоиспользования отдельного или нескольких предприятий;

– разработка многоступенчатых схем водооборота с индивидуальной очисткой стоков и адресным кондиционированием оборотной воды.

### Список литературы к разделу 5.6

1. Баймаханов М.Т., Лебедев К.Б., Озеров А.И. Очистка и контроль сточных вод предприятий цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1983.

2. Малкин В.П. Технологические аспекты очистки промстоков, содержащих ионы тяжелых металлов. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1991.

3. Химия промышленных сточных вод / под ред. А. Рубина. – М.: Химия, 1983.

4. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А.М. Кочановский [и др.]. – М.: Химия, 1983.

5. Небера В.П. Флокуляция минеральных суспензий. – М.: Недра, 1983.

6. Пономарев В.Т., Иоакимис Э.Г., Монтайт И.Л. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. – М.: Химия, 1985.

7. Хабаров О.С. Безреагентная очистка сточных вод. – М.: Химия, 1982.

8. Яковлев С.В., Краснобородько И.Г., Rogov В.М. Технология электрохимической очистки воды. – Л.: Стройиздат, 1987.

9. Гольман А.М. Ионная флотация. – М.: Недра, 1982.

10. Катюшиш Г.Н. Очистка природных и сточных вод. – М.: ВНИТИЦентр, 1993. – Вып. 23.

11. Кульский А.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. – Киев: Наукова думка, 1981.

12. Гребенюк В.Д., Мазо А.Л. Обессоливание воды ионитами. – М.: Химия, 1980.

13. Ковалев В.А. Интенсификация электрохимических процессов водоочистки. – М.: Химия, 1986.

14. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. – Киев: Наукова думка, 1980.

15. Евилёвич А.З., Евилёвич М.А. Утилизация осадков сточных вод. – Л.: Стройиздат, 1988.

16. Мирзахметов М. Водоснабжение и водоотведение флотационных обогатительных фабрик. – Алма-Ата: КАЗНИИНТИ, 1991.

17. Обратное водоснабжение углеобогатительных фабрик / И.С. Благов [и др.]. – М.: Недра, 1980.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные проблемы горной науки и горного производства, как и изменение содержания и концепции горных наук, обусловлены назревшей необходимостью заполнить крупный пробел в знаниях о техногенно-изменяемых недрах. Этот пробел образовался в связи с тем, что для горных наук остается традиционным следование в своем развитии главным образом запросам горнодобывающей промышленности. Между тем со временем все более очевидным становится противоречие в отношении к недрам. С одной стороны, по сложившейся практике, с завершением эксплуатации месторождений полезных ископаемых эти участки недр уже перестают быть объектами делового интереса горняков вне зависимости от состояния оставленных ими нарушенными горных массивов и экологических последствий освоения. С другой стороны, накопленные за многие годы объемы геомеханических нарушений в недрах и на поверхности земли, а также сопряженные с ними биосферные изменения стали настолько велики, что недра при значительном сокращении минерально-ресурсной базы за этот период времени перестали играть определяющую роль для биологических, территориальных, экономических и иных важнейших условий жизни. При этом следует признать, что сложившееся понимание недр лишь как вместилища отдельных месторождений полезных ископаемых – объектов эксплуатации – является одной из важнейших причин эколого-экономического кризиса, переживаемого нашей страной.

Сегодня необходимо четко понимать, что нет и не может быть создано никакого другого, помимо горного, производства, которое было бы предназначено и способно предотвращать неблагоприятные последствия освоения недр, устранять такие последствия и обеспечить для будущих поколений возможность дальнейшего пользования недрами с учетом всех присущих недрам функций. Настало время для того, чтобы с недрами связывалось представление о средоточии разнообразных, не только минерально-сырьевых, но и других жизненно важных для общества ресурсов, сопряженных друг с другом генетически, а при освоении – и технологически, экономически и экологически. Исходя из этого, сложившиеся ныне границы, охватывающие область горного дела, следует существенным образом расширить.

Извлечение из недр и использование полезных ископаемых с заданными показателями уже не может быть признано конечной и единственной целью их освоения.

Освоение недр в каждом случае должно предполагать их сохранение как источника важнейшей части национального природного богатства и главного природоорганизующего компонента в соблюдении экологического равновесия. Поэтому цель горного дела состоит в постоянном воспроизведении этого природного богатства и условий экологического равновесия путем придания недрам технологическими и иными средствами новых полезных качеств в процессе их техногенного преобразования.

Иными словами, по окончании эксплуатации участок недр должен быть воссоздан (сохранен) для общества как объект, ценный в хозяйственном, экологическом, научном, бальнеологическом, культурном, рекреационном отношении, по условиям геомеханической безопасности населения или по иным соображениям, исходя из присущих ему природных, а также созданных при освоении недр новых георесурсных предпосылок. Только так может быть преодолена кризисная тенденция в техногенной эволюции недр.

Горная наука и практика, решая проблемы обеспечения потребностей общества в необходимых георесурсах, не должны останавливаться лишь на проблемах сведения баланса производства и потребления минерального сырья. Сегодня необходимо подниматься на более высокий уровень проблем сохранения и увеличения природного богатства и экологического потенциала недр. Возможности для этого закладываются при разнообразной эксплуатации георесурсов и приобретают конкретную форму и значение в процессе сохранения недр.

Современная концепция освоения и сохранения недр предполагает многофункциональность горных предприятий, которые реализуют не только утилитарную цель – обеспечение конкретных текущих общественных потребностей, но и укрепляют основу жизни, увеличивая георесурсное разнообразие и за счет этого величину природного богатства недр и экологического потенциала, в формировании которого недрам принадлежит главенствующая роль.

Учебное издание

АНДРЕЙКО Сергей Семенович

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА  
В ОБЛАСТИ ГОРНОГО ДЕЛА

Учебное пособие

Редактор и корректор *И.А. Мангасарова*

---

Подписано в печать 16.11.10. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 27,41. Тираж 100 экз. Заказ № 242/2010.

---

Издательство  
Пермского государственного технического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33