

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
университет имени Т.Ф. Горбачева»

П.В. Егоров Ю.А. Шевелёв М.С. Вагапов Р.Р. Зайнулин

**ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ
РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
второе издание

**Рекомендовано в качестве учебного пособия
учебно-методической комиссией специальности
130404 «Подземная разработка месторождений полезных
ископаемых»**

Кемерово 2011

Рецензенты:

Потапов В. П., профессор, д-р
техн.наук

Директор филиала Института вычислительных тех-
нологий СО РАН

Егоров Пётр Васильевич и др. Геотехнологические способы разработки полезных ископаемых: учеб. пособие [Электронный ресурс] : для студентов очной и заочной формы обучения специальностей 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» / **П.В. Егоров и др.** – Электрон. дан. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв. ; цв. ; 12 см. – Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows 95 ; (CD-ROM-дисковод) ; мышь. - Загл. с экрана.

Изложены вопросы геотехнологических способов разработки полезных ископаемых. Рассмотрены физико-химические основы геотехнологических процессов. Описаны вскрытие, подготовка и системы разработки месторождений, производственные процессы и оборудование при геотехнологии. Показана специфика проектирования геотехнологических предприятий.

© КузГТУ
© **П.В. Егоров и др.**

1. СУЩНОСТЬ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Сущность геотехнологических методов заключается в переводе полезного ископаемого в подвижное состояние.

Классификация геотехнологических способов по процессам добычи, в основе которых лежат вид и способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние, приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Классификация геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых

Вид подвижного состояния полезного ископаемого	Способы перевода полезного ископаемого в подвижное состояние		
	Физические	Химические	Комбинированные (комплекс физических, химических и биологических воздействий)
Газообразное	Воздействие температуры, давления (сублимация, перегонка)	Окисление, разложение (частичное или полное сжигание, обжиг)	Химические реакции с участием физических полей, микробиологического воздействия
Жидкотекучее (расплав, раствор)	Воздействие температуры, давления (плавление, перегонка, нагрев)	Выщелачивание и растворение с образованием молекулярных растворов	Растворение, выщелачивание и гидрогенизация с участием физических полей, микробиологического воздействия
Гидромеханическая смесь	Гидро-, пневморазрушение, воздействие физическими полями	Растворение связующего вещества	Диспергирование поверхностно-активными веществами, химическими реагентами с участием физических полей, микробиологического воздействия

Особенности геотехнологических способов разработки полезных ископаемых:

- разработка месторождения ведется через скважины, которые служат для вскрытия, подготовки и добычи полезного ископаемого;
- месторождение является и объектом, и местом добычи и переработки полезного ископаемого, т. к. технология предусматривает избирательное извлечение полезного компонента;
- геотехнологическое предприятие – промысел (станция) – включает три основных элемента: блок подготовки рабочих агентов, добычное поле, блок переработки продуктивных флюидов;
- инструментом добычи служат рабочие агенты – энергия или ее носители, вводимые в добычное поле;
- под воздействием рабочих агентов полезное ископаемое изменяет свое агрегатное состояние или превращается в другое вещество, образуя продуктивные флюиды, обладающие легкой подвижностью;
- разработка месторождения имеет зональный характер и перемещается во времени относительно скважин и контуров месторождения;
- управление добычей осуществляется с поверхности путем изменения характеристики и параметров подачи рабочих агентов.

Геотехнологические способы широко используются для добычи ряда полезных ископаемых: соли, серы, урана, меди и др. По другим полезным ископаемым ведутся полупромышленные, опытные и лабораторные исследования.

В настоящее время наибольшее применение нашли следующие геотехнологические способы:

- подземное растворение – метод добычи полезных ископаемых растворением его на месте залегания. Применяется для разработки соляных месторождений и создания подземных емкостей;
- подземное выщелачивание – метод добычи полезных ископаемых избирательным растворением их химическими реагентами на месте залегания с извлечением на поверхность продукционных растворов. Подземное выщелачивание относится к фильтрационным процессам и основано на химических реакциях «твердое тело – жидкость». В основном оно применяется для добычи цветных, редких и радиоактивных металлов. Бактериальное выщелачивание – метод интенсификации выщелачивания с помощью микроорганизмов;

- подземная выплавка – метод добычи легкоплавких минералов посредством подачи теплоносителя по скважинам в залежь и извлечение полезного ископаемого на поверхность в виде расплава. Применяется для добычи серы (метод Фраша), вязких углеводородов;
- подземная газификация – метод добычи полезных ископаемых путем перевода их в газообразное состояние. Например, подземный термохимический процесс перевода угля в газ, пригодный для энергетических и химико-технологических целей;
- скважинная гидродобыча – метод добычи, основанный на приведении полезного ископаемого в подвижное состояние путем гидромеханического воздействия и выдачи в виде гидросмеси на поверхность.

Такое полезное ископаемое, как тепло Земли, входит в сферу геотехнологии. Использовать тепло Земли можно, утилизируя природные парогидротермы, а также (идея академика В.А. Обручева) тепло глубинных «сухих» горных пород.

Основными проблемами геотехнологии являются:

- установление связи физико-геологической обстановки залежи, полезного ископаемого и вмещающих пород с рабочими агентами и средствами добычи на уровне молекул, ионов, атомов;
- совершенствование управления геотехнологическими процессами с целью повышения их производительности и селективности;
- создание новых и совершенствование известных технологий прямого превращения ископаемого в целевые компоненты, основанных на малооперационности, поточности, простоте обслуживания и надежности, безотходности, малой энергоемкости, высокой производительности труда и низкой себестоимости;
- совершенствование технологии переработки и утилизации добытых продуктивных флюидов;
- охрана окружающей среды и социальные аспекты горного дела.

В табл. 1.2 приведены основные сведения о современном состоянии использования геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых.

Заслуживают изучения такие перспективные методы, как гидрогенизация угля и битумов на месте их залегания, скважинная добыча углей воздействием на них углеводородов, использование земных недр в

качестве реакторов для осуществления технологических процессов, протекающих при высоких температурах и давлениях.

Таблица 1.2

Современное состояние использования геотехнологических способов

Способ	Объекты промышленного освоения	Объекты полупромышленных и опытных исследований, разработки, предложения и патенты
Подземное растворение	Месторождения каменной соли, калийных солей	Месторождения бишофита, соды, глауберовой соли
Подземное выщелачивание	Зоны окисления сульфидных месторождений меди и никеля. Уран инфильтрационных и осадочно-инфильтрационных месторождений, а также забалансовые участки эндогенных месторождений	Месторождения марганца, сульфидные месторождения меди, свинца, цинка и никеля, золота, титана, известняка. Осадочные бурожелезняковые месторождения
Подземная выплавка	Месторождения самородной серы	Сера в непроницаемых рудах, битум и тяжелая нефть. Озокерит, сера вулканогенных месторождений, асфальтит, металлы
Подземная газификация	Месторождения каменного и бурого угля	Осушенные месторождения серы. Известняк, месторождения горючих сланцев, руд, содержащих мышьяк и ртуть
Скважинная гидродобыча	Месторождения фосфоритов, строительных песков	Осадочные месторождения металлов, строительные пески и гравий. Титан, золото и алмазы, касситерит в погребенных россыпях, желваковые фосфориты, уголь, мягкие бокситы, железо и т. д.
Добыча полезных ископаемых из подземных вод	Месторождения йодобромистых вод, содержащих бор, уран, стронций	Сточные воды шахт, рудников и нефтепромыслов
Извлечение и использование тепла Земли	Природные парогидротермы	Тепло «сухих» горных пород

Наиболее полно вопросы теории геотехнологии, вскрытия, подготовки и систем разработки, специфика проектирования и методы расчёта параметров добычи геотехнологическими методами изложены в монографии В.Ж. Аренса, [1].

Контрольные вопросы

- 1. В чём заключаются особенности геотехнологических методов разработки полезных ископаемых?*
- 2. Какие геотехнологические способы нашли наибольшее применение в наше время?*
- 3. В чём заключаются основные проблемы геотехнологии?*
- 4. Опишите современное состояние геотехнологических способов разработки.*

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В геотехнологии неприемлемо рассмотрение отдельно взятых горных пород. Необходимо исследовать горную среду, представляющую одну или несколько гетерогенных систем с различными компонентами, присутствующими в твердой, жидкой или газообразной фазах. Исследование горной среды заключается в изучении состояния (положение залежи, мощность, обводнённость, условия питания и разгрузки), состава (минеральный, химический, гранулометрический состав и рН пластовых вод), строения (структура и текстура руд, пористость и трещиноватость, неоднородность в разрезе и плане) и свойств (фильтрационные – проницаемость, водопроницаемость, размываемость, вязкость, пластичность, размокаемость, влагоёмкость, влагоотдача, хрупкость, консолидация, крепость и т. д.) полезного ископаемого и горных пород, его вмещающих.

Состояние горного массива определяется степенью заполнения пор, трещин и пустот газами или жидкостью, температурой залежи и окружающей среды, положением залежи в горном массиве. Состояние горного массива может быть определено как обводненное (полное заполнение пор и пустот жидкостью), влажное (частичное заполнение пор и пустот жидкостью и газами), воздушно-сухое (вода или жидкость может присутствовать в виде пара и физически связанной воды).

Под изучением состава горных пород подразумевается: определение вещественного состава, исследование морфологоминералогических ассоциаций, образующих полезное ископаемое, изучение минералогического состава, в том числе определение химических элементов и соединений, определение гранулометрического и микроагрегатного составов залежи.

Наряду со структурой и текстурой полезных ископаемых важное значение имеет изучение их пористости и трещиноватости. Эффективная, или открытая, пористость определяет возможность осуществления многих геотехнологических способов разработки, так как позволяет перемещаться в массиве рабочим реагентам и полезному ископаемому под воздействием градиентов давления.

Так как состав, строение и свойства массивов горных пород подробно изучались ранее, ниже рассмотрим только специфические свойства массивов горных пород, наиболее важные при геотехнологических способах разработки месторождений полезных ископаемых.

Для желающих более полно ознакомиться со свойствами горных пород, можно порекомендовать монографию В.В. Ржевского и Г.Я. Нювика, [3].

2.1. Гидравлические свойства массива горных пород

Гидравлические свойства массива горных пород имеют наибольшее значение для геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых. Основной группой гидравлических свойств являются *фильтрационные*. Их иногда называют *коллекторскими*. В первую очередь фильтрационные свойства зависят от пористости, т. е. совокупности всех пустот в горных породах, заключенных между минеральными частицами или их агрегатами.

Общая пористость – отношение объема пустот и пор к объему горной породы.

Отношение объема пор к объему минерального скелета породы называется *коэффициентом пористости*.

По величине поры подразделяются на *субкапиллярные* (диаметр пустот менее 0,2 мкм), *капиллярные* (0,2 – 100 мкм) и *сверхкапиллярные* (более 100 мкм). Поры часто могут соединяться с внешней средой и между собой, образуя сплошные извилистые каналы.

Динамическая пористость – учитывает только те поры, по которым может фильтроваться жидкость, иногда ее еще называют *открытой (эффективной) пористостью*.

Площадь поверхности, образуемая стенками пустот и пор, является одной из важнейших геотехнологических характеристик горной породы – *проницаемостью*.

Свойство горных пород пропускать через себя жидкости и газы характеризуется *коэффициентом проницаемости* и *коэффициентом фильтрации*, которые связаны между собой соотношением

$$K_f = \frac{K_{пр} \rho_{ж}}{\mu}, \quad (2.1)$$

где K_f – коэффициент фильтрации, м/с; $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; μ – вязкость жидкости, Па·с.

Для целей геотехнологии проницаемость горных пород следует определять в натуральных условиях, т. к. только при этом можно учесть всю гамму влияющих факторов.

Различают абсолютную, эффективную и относительную проницаемость.

Абсолютная проницаемость характеризует пропускную способность образца для воздуха при атмосферном давлении и вычисляется по линейному закону фильтрации.

Эффективная (фазовая) проницаемость характеризует пропускную способность для различных жидкостей.

Относительная проницаемость – отношение эффективной проницаемости к абсолютной.

Практической единицей измерения проницаемости является дарси (Д) – величина проницаемости, присущая образцу породы площадью 1 см², длиной 1 см, через который при давлении $9,8 \cdot 10^4$ Па проходит в одну секунду 1 см³ жидкости вязкостью 10^{-3} Па·с. При этом $1 \text{ Д} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

В практике горного производства широкое распространение получил другой параметр – *коэффициент фильтрации* K_f . Практически он представляет собой скорость фильтрации газа или жидкости через породы. Коэффициент фильтрации не учитывает влияние напора пластовых вод и их вязкости на изменение количества фильтрующейся воды.

В случае фильтрации воды между коэффициентами пористости и фильтрации существует соотношение $1 \text{ Д} = 1 \text{ см/с} = 864 \text{ м/сут}$.

В зависимости от значения коэффициента фильтрации породы подразделяются на *водоупорные* $K_f < 0,1$ м/сут, *слабопроницаемые* $0,1 \leq K_f < 10$, *среднепроницаемые* $10 \leq K_f < 500$ и *легкопроницаемые* $K > 500$.

В горных породах различают проницаемость *межгранулярную* и *трещинную*, причем последняя значительно выше. Для осадочных пород *трещинная проницаемость* составляет $(1,5 - 4,0) \cdot 10^{-14}$ м², а *межгранулярная* – до 10^{-16} м².

Кроме фильтрационных к гидравлическим свойствам массивов горных пород относят:

- *влагоемкость* – способность горных пород вмещать и удерживать воду;
- *водоотдачу* – способность горных пород отдавать воду путем свободного вытекания;
- *водоустойчивость* – способность горных пород сохранять связность, консистенцию и прочность при взаимодействии с водой;
- *капиллярность* – способность горных пород поднимать влагу по порам под воздействием капиллярных сил;
- *набухание* – способность горной породы увеличивать объем под воздействием влаги;
- *усадку* – способность горной породы уменьшать объем при высыхании;
- *просадочность* – способность горной породы уменьшать объем при замачивании;
- *смачиваемость* – способность горной породы входить в молекулярное взаимодействие с жидкостями;
- *адсорбцию* – способность горной породы концентрировать на своей поверхности различные вещества из газов, паров и жидкостей;
- *абсорбцию* – способность горной породы поглощать пары, газы и жидкости;
- *липкость* – способность горной породы прилипать к различным предметам.

2.2. Тепловые свойства горных пород

Тепловые свойства лежат в основе геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых, использующих

свойство части горной породы при нагревании до определенной температуры переходить из твердой в жидкую или газообразную фазы.

Способность горных пород к фазовым превращениям подразделяется на плавление, испарение, сублимацию, кристаллизацию и конденсацию.

Плавление – способность полезного ископаемого переходить в жидкое состояние при нагревании. Характеризуется температурой плавления и удельной теплотой плавления. Под *температурой плавления* понимается температурный интервал, определяющий температуру начала плавления горной массы и полного перехода ее в жидкое состояние. *Удельная теплота плавления* – количество тепла, необходимое для плавления единицы горной массы.

Испарение (парообразование) – способность полезного ископаемого переходить из твердой или жидкой фазы в газообразную. Оценивается количественно *теплотой испарения*, т. е. количеством тепла, необходимым для преодоления сил связи между молекулами и их «отрыва» с поверхности.

Сублимация – способность полезного ископаемого переходить из твердого состояния в газообразное; количественно оценивается *теплотой сублимации*.

Кристаллизация – способность полезного ископаемого к образованию и росту кристаллов из расплавов, растворов или газов. Возникает в результате нарушения равновесия исходной фазы (перенасыщение или переохлаждение). В количественном отношении она характеризуется степенью кристаллизации и температурой кристаллизации. *Степень кристаллизации* – количество вещества, выделившегося в твердую фазу из раствора или расплава. *Температура кристаллизации* – температура, соответствующая началу образования твердой фазы.

Конденсация – способность полезного ископаемого переходить из газообразного в твердое или жидкое состояние.

При расчете технологических параметров геотехнологических способов, основанных на нагреве полезного ископаемого, также используются следующие тепловые свойства массивов горных пород: теплопроводность, теплоемкость, тепловое расширение или сжатие.

Теплопроводность – способность горной породы передавать тепловую энергию при возникновении разности температур. Характеризуется *коэффициентом теплопроводности* и *коэффициентом конвекции*.

Теплоемкость – способность горной породы повышать свое теплосодержание при повышении температуры. Характеризуется удельной, средней и истинной теплоемкостью, а также коэффициентом температуропроводности.

Тепловое расширение (сжатие) – способность горной породы изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Характеризуется коэффициентами объемного и линейного расширения.

2.3. Электромагнитные и радиационные свойства горных пород

При наложении на массив горных пород электрических, магнитных или радиационных полей в ряде случаев достигается интенсификация химических и физических процессов геотехнологии. В отдельных случаях удается даже привести полезное ископаемое в подвижное состояние этими воздействиями. Широко используют эти методы воздействия при разведке месторождений, для контроля за ходом геотехнологических процессов, при предварительной переработке добытого полезного ископаемого.

К электрическим свойствам относят: *электропроводность, электрическую прочность, поляризацию.*

Электропроводность характеризуется количественно *удельной электропроводностью (удельным электрическим сопротивлением)* и *коэффициентом электрической анизотропии.*

Электрическая прочность – способность горной породы сопротивляться разрушающему действию электрического напряжения. Количественно измеряется пробивным напряжением.

Поляризация – способность горной породы взаимодействовать с окружающим электрическим полем. Оценивается *относительной диэлектрической проницаемостью* и *углом диэлектрических потерь.*

К магнитным свойствам горных пород относят: *магнитную восприимчивость* и *остаточную намагниченность.*

Магнитная восприимчивость – свойство горных пород намагничиваться под воздействием внешнего магнитного поля.

Остаточная намагниченность – способность горной породы сохранять намагниченность.

К радиационным свойствам горных пород относят: *естественную радиоактивность* и *способность поглощать α -, β -, γ и нейтронное излучение.*

Естественная радиоактивность – способность горной породы создавать радиоактивное излучение.

2.4. Механические и акустические свойства массива горных пород

При геотехнологических способах разработки месторождений полезных ископаемых необходимо учитывать и использовать некоторые специфические механические, а также акустические свойства массива горных пород.

К этим специфическим механическим свойствам относят: *тиксотропность, прочность, твердость, вязкость разрушения, упругость, пластичность, компрессионную способность, хрупкость.*

Тиксотропность – способность горных пород, содержащих коллоидные фракции, под воздействием динамических нагрузок к обратимым переходам из твердого состояния в жидкое. Тиксотропность зависит от вида воздействия, его интенсивности и длительности.

Прочность – способность горной породы сопротивляться разрушению под воздействием внешних сил. Характеризуется количественно: пределом прочности при одноосном сжатии или растяжении, сопротивлением срезу, пределом прочности при изгибе, коэффициентом крепости.

Твердость – способность горной породы оказывать сопротивление локальному воздействию. Количественно характеризуется показателем статической и динамической твердости.

Вязкость разрушения – способность горной породы сопротивляться развитию в ней трещин.

Упругость – способность горной породы восстанавливать после снятия нагрузки свою первоначальную форму и размеры. Количественно характеризуется модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, модулем сдвига, коэффициентом всестороннего сжатия.

Пластичность – способность горной породы изменять форму без разрыва сплошности при силовом воздействии и сохранять эту форму при снятии действующей нагрузки. Количественно характеризуется степенью пластичности, коэффициентами пластичности и уплотнения.

Компрессионная способность – способность горной породы сжиматься при вертикальной нагрузке и невозможности бокового расширения. Характеризуется количественно: коэффициентами уплотнения и консолидации, модулями осадки и полной деформации.

Хрупкость – способность горной породы к внезапному разрушению при нагрузке без заметных пластических деформаций. Количественно характеризуется коэффициентом хрупкости.

Акустические свойства при прохождении через горную породу звуковых волн характеризуются *акустической проводимостью* и *поглощением*; используются и учитываются при разрушении массивов ультразвуковыми волнами, а также при геофизических методах контроля.

Контрольные вопросы

1. *Дайте характеристику гидравлическим свойствам массива горных пород: пористости, влагоёмкости, водоустойчивости, водоотдаче, капиллярности, набуханию, усадке и просадочности.*

2. *Дайте характеристику гидравлическим свойствам массива горных пород: фильтрации, смачиваемости, адсорбции, абсорбции и липкости.*

3. *Дайте характеристику тепловым свойствам горных пород: плавлению, испарению, сублимации и кристаллизации.*

4. *Дайте характеристику тепловым свойствам горных пород: конденсации, теплопроводности, теплоёмкости, тепловому расширению и сжатию.*

5. *Дайте характеристику электрическим свойствам горных пород: электропроводности, электрической прочности и поляризации.*

6. *Дайте характеристику магнитных и радиационных свойств горных пород: магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности, естественной радиоактивности, способности поглощать α -, β -, γ - и нейтронное излучение.*

7. *Дайте характеристику механическим свойствам горных пород: тиксотропности, прочности, твердости и вязкости разрушения.*

8. *Дайте характеристику механическим свойствам горных пород: упругости, пластичности, компрессионной способности, хрупкости.*

9. *Дайте характеристику акустическим свойствам горных пород.*

3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В основе геотехнологических способов лежат физические и химические процессы. Физические процессы сопровождаются изменением формы, внешнего вида и физических свойств полезного ископаемого. Химические процессы сопровождаются изменением химического состава и химических свойств полезного ископаемого. Каждый геотехнологический способ включает не один, а несколько различных процессов, одни из которых являются *основными*, другие – *вспомогательными*, третьи – *обеспечивающими*.

К *основным процессам* относят процессы, связанные с добычей полезных ископаемых. Например, процессы перевода полезного ископаемого в подвижное состояние, доставки рабочих агентов в добычное поле, выдачи продуктивных флюидов на поверхность.

К *обеспечивающим процессам* относят процессы, дающие возможность выполнять добычные процессы. Это процессы вскрытия и подготовки месторождения, приготовления рабочих агентов, переработки продуктивных флюидов, контроля и управления параметрами добычи, качества.

К *вспомогательным процессам* относят энергоснабжение, ремонт добычного оборудования, геолого-маркшейдерское обслуживание добычных работ.

Кроме того, реализация геотехнологических процессов добычи требует не только их всестороннего изучения, но и учета процессов сдвига горных пород под влиянием сил горного давления.

3.1. Основы процессов растворения и выщелачивания полезных ископаемых

С помощью различных растворителей можно переводить в подвижное состояние многие полезные ископаемые. Такой перевод происходит в результате процессов растворения и выщелачивания, которые различаются механизмом взаимодействия растворителя и полезного ископаемого.

Растворение протекает в результате диффузии и межмолекулярного взаимодействия без нарушения химического состава полезного

ископаемого. Процесс растворения лежит в основе скважинной добычи растворимых в воде солей: галита, сильвина, бишофита и др.

Выщелачивание сопровождается изменением полезного ископаемого как химического соединения и переводом его в раствор. Способом выщелачивания извлекают из руд металлы, их соли и окислы.

В качестве выщелачивающих агентов используют кислоты и водные растворы солей.

Процесс растворения – *гетерогенная реакция*, происходящая на границе раздела двух сред: твердой и жидкой. Она включает:

- поступление растворителя к поверхности растворяемого вещества;
- взаимодействие растворителя и растворяемого вещества (межфазные процессы);
- удаление растворенного вещества от поверхности растворяемого вещества (диффузионный процесс).

Скорость *диффузионного процесса* растворения определяется разностью концентраций растворяемого вещества на контакте между пограничным слоем насыщенного рассола и общей массой растворителя. По мере насыщения раствора скорость растворения уменьшается по логарифмическому закону.

Различают:

- массовую скорость растворения – количество соли, растворяемое в единицу времени с единицы поверхности;
- линейную скорость растворения – расстояние, на которое распространяется растворение в единицу времени.

Скорость растворения зависит от угла наклона поверхности растворяемого вещества и температуры растворителя. В то же время она зависит от давления только при очень высоких его значениях.

Особенно сложен процесс, когда необходимо осуществить растворение одновременно нескольких веществ, например сильвинита, состоящего из хлористого калия (сильвина), и хлористого натрия (галита).

Кристаллизация соли – процесс, обратный растворению. Она наступает, когда раствор при данной температуре перенасыщен солью, и происходит вследствие испарения части растворителя или понижения температуры насыщенного раствора. Скорость кристаллизации зависит от присутствия в растворе зародышей кристаллов, быстроты охлаждения раствора, перемешивания, начальной температуры, чистоты раствора.

Природа растворения солей очень сложна, еще больше ее осложняет наличие нерастворимых компонентов.

Процесс выщелачивания более сложный, чем процесс растворения. Он описывается сложными дифференциальными уравнениями с учетом влияния формы, размеров и полисперстности частиц, длины слоя, концентрации растворителя, гидродинамики движения жидкости.

Методы химического извлечения минералов, основанные на выщелачивании, предусматривают главным образом селективное извлечение полезного компонента.

Механизм процесса выщелачивания определяется структурой и составом растворяемого минерала, характером химической связи в его кристаллической решетке, комплексом физико-химических свойств растворителя.

В основе выщелачивания могут лежать:

- *обменные реакции*, при которых происходит образование легкорастворимых соединений за счет обмена ионами (взаимодействие окислов и солей металлов с кислотами);

- *окислительно-восстановительные реакции*, при которых происходит образование легкорастворимых соединений за счет передачи электронов от атомов выщелачивающего агента к атомам минерала и наоборот; вещества, отдающие электроны, называются восстановителями, а принимающие – окислителями;

- *реакции с образованием комплексных соединений* (цианирование руд).

Часто процессы выщелачивания сопровождаются осаждением из раствора ценных компонентов или образованием плотных пленочных покрытий на поверхности растворения.

Выщелачивание является основной операцией при извлечении урана на месте залегания руд с низким содержанием полезного компонента. Оно определяет величину извлечения и стоимость конечного продукта. Несмотря на многообразие типов месторождений, руд и минералов, содержащих уран, для извлечения его обычно используют водные растворы минеральных кислот или солей карбонатов щелочных металлов.

При подземном выщелачивании к растворителю предъявляются следующие требования:

- обеспечение относительно полного перевода полезного компонента в раствор;

- низкая стоимость реагента и его наличие в народном хозяйстве;
- селективность в процессе выщелачивания;
- обеспечение коррозионной стойкости применяемой аппаратуры и материалов;
- исключение условий, приводящих к засорению пор и капилляров в выщелачиваемой рудной массе и снижающих проницаемость массива;
- возможность осуществления процесса без нагрева, дополнительного измельчения, перемешивания и т. п. («мягкие» условия).

Наиболее дешевым растворителем для выщелачивания является серная кислота. Другие растворители характеризуются следующими коэффициентами относительно последней: HNO_3 – 2,15; HCl – 2,38; NaHCO_3 – 1,06; Na_2CO_3 – 1,18; NH_4HCO_3 – 1,32; $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ – 3,00.

Для интенсификации процесса при подземном выщелачивании некоторых руд в растворитель добавляют окислитель. В качестве последнего могут быть использованы: кислород, перманганаты, перекись водорода, азотсодержащие окислители и др.

Процесс выщелачивания включает *три основные стадии*:

- доставку растворителя к поверхности выщелачиваемых минералов;
- химическую реакцию с образованием растворимых солей;
- перевод растворенных продуктов реакции в объем раствора.

В процессе выщелачивания происходит снижение проницаемости массива. Это явление называется кольтматацией. Выделяют следующие формы кольтматации:

- химическую, связанную с образованием в порах химических осадков;
- газовую, обусловленную образованием газообразных продуктов в пласте в результате взаимодействия кислоты с карбонатными составляющими пород;
- ионообменную, связанную с изменением размера пор в присутствии органического вещества и глинистых частиц в проницаемых породах под действием изменения рН и минерализации фильтрующихся растворов;
- механическую, вызываемую закупоркой поровых каналов пород механическими взвесями или частицами, содержащимися в фильтрующихся растворах.

При отработке месторождения способом подземного выщелачивания обычно одновременно возникают и сосуществуют несколько форм кольтматации.

Переведенный в раствор полезный компонент не полностью извлекается в процессе отработки. Часть его поглощается безрудными породами. Это негативный процесс, определяющий одно из слагаемых потерь полезного ископаемого в недрах.

На практике поглощение растворенного полезного компонента осуществляется покрывающими и подстилающими породами, а также слабопроницаемыми безрудными прослоями рудовмещающего горизонта. Потери за счет поглощения в первый период выщелачивания могут достигать до 20–30 % относительно общего объема выщелачиваемого компонента. Однако впоследствии, благодаря постоянной фильтрации по проницаемому слою растворителя, эти потери могут быть снижены до 5–6 %.

По характеру проникновения внутрь куска растворителя руды делят на три типа:

- руды, в которых растворитель просачивается одновременно и постоянно со всех сторон;
- руды, в которых растворитель проникает сначала по трещинам и плоскостям слоистости, т. е. по основным каналам, а затем из них поступает в мельчайшие поры и капилляры;
- руды, которые при обработке растворителем разрушаются.

Пористость рудных монолитов обычно во много раз ниже пористости глин (эффективная пористость скальных руд обычно составляет 0,5–3,0 %), однако размеры пор и капилляров в куске больше, чем в глинистых породах.

3.2. Термические и термохимические методы воздействия на массив горных пород

Термическое воздействие на горные породы изменяет агрегатное состояние вещества в форму, удобную для доставки к скважине и на поверхность (жидкость, газ), а также физические свойства (например, уменьшает вязкость, улучшает условия фильтрации). Указанное фазовое превращение обычно является эндотермическим процессом и требует подвода тепловой энергии. Подвод тепла может осуществляться различными теплоносителями (дымовые газы, пар, горячая вода и т. п.),

воздействием на пласт различного рода полями или за счет тепла, выделяющегося при ядерной реакции.

Выбор температуры воздействия зависит от свойств конкретного полезного ископаемого и вмещающего массива.

Например, температура плавления озокерита лежит в пределах 50...80 °С, серы 112,8...119 °С, бишофита 117 °С, сильвина 770 °С. Причем, при температуре около 160 °С вязкость серы повышается примерно в 800 раз. Необходимо отметить, что при превышении определенной температуры начинаются химические превращения вещества.

Характер протекания процессов термического воздействия на горные породы во многом зависит от того, из каких минералов и агрегатных структур состоит массив, от стабильности их характеристик.

Практический эффект зависит от количества подведенного к пласту тепла. Подавая заданные объемы теплоносителя в пласт, можно регулировать, например, радиус зоны плавления.

Процесс подземной выплавки представляет собой комплекс сложных физических явлений, математическое описание которых не всегда возможно.

При подземной выплавке рудный пласт разогревается до температуры плавления полезного компонента путем нагнетания в массив горячего теплоносителя, который, фильтруясь по трещинам, кавернам и крупным порам, вытесняет холодную воду и выплавляет полезный компонент. Для разогрева пласта могут использоваться различные теплоносители: горячие дымовые газы, парогазовая смесь, пар, горячая вода, рассолы с различным удельным весом. Теплоноситель должен иметь большую удельную теплоемкость, хорошие вытесняющие свойства и быть дешевым в производстве. Выбор теплоносителя чрезвычайно важен, т. к. 50–60 % затрат приходится на получение и подогрев теплоносителя.

Скорость прогрева массива различными теплоносителями характеризуется *коэффициентом термоинжекции*. Для воздуха, дымовых газов, пара, пара и воды он соответственно составляет: 1, 2, 11, 31, 123. Наиболее эффективный термоинжекционный агент – горячая вода.

Тепловая энергия на подземном участке вокруг добычной скважины распространяется за счет:

- кондуктивного теплообмена, интенсивность которого полностью определяется температурными условиями протекания процесса и физическими свойствами рудного тела;

- конвекции, при которой интенсивность процесса зависит от закономерностей движения жидкости, определяемых уравнениями аэрогазодинамики;

- теплообмена между теплоносителями и рудным массивом.

У добычной скважины в зоне плавления взаимодействуют две жидкие и твердая фазы (расплавленный полезный компонент, вода и минералы, составляющие рудный скелет).

Расплавленный теплом горячей воды полезный компонент за счет большого удельного веса стекает к почве пласта призабойной зоны скважины, образуя так называемую лужу, нижняя часть которой соприкасается с холодными подстилающими породами. При прекращении инъекции горячей воды в пласт в результате аварии или при ремонте важным параметром является время остывания расплавленного вещества.

Наиболее разработан процесс подземной выплавки применительно к месторождениям самородной серы.

Термохимические процессы при геотехнологии основаны на энергетических изменениях системы при химических превращениях полезных ископаемых, возникающих под действием внутрипластового теплового очага. Термохимические процессы лежат в основе таких геотехнологических способов, как подземное сжигание серы, газификация угля и сланцев, тепловое воздействие на нефтеносные пласты, подземное сжигание угля.

Обычно наличие очага приводит к тому, что в массиве образуются отдельные зоны, для каждой из которых характерны определенные реакции и температуры. Для обоснования *оптимального режима* термохимического процесса необходимо выяснить:

- распределение физико-химических зон процесса;
- влияние и характер изменения фильтрационных зон;
- характер распространения температурных зон;
- режимы подачи рабочих агентов и т. п.

Одним из резервов развития геотехнологических способов является добыча полезных ископаемых непосредственно из магмы, однако это еще недостаточно изучено.

3.3. Принцип диспергирования горных пород

Диспергирование – тонкое измельчение твердых тел или жидкостей, в результате которого образуются дисперсионные системы: порошки, суспензии, эмульсии, аэрозоли.

Удельная работа, затрачиваемая на диспергирование, зависит от характеристик и структуры измельчаемой породы, поверхностной энергии и степени измельчения.

Введение поверхностно-активных веществ (ПАВ): диспергаторов, эмульгаторов, понизителей твердости, – снижает энергозатраты при диспергировании и повышает дисперсность измельченной фазы.

Этот процесс пока не нашел промышленного применения в геотехнологии.

3.4. Воздействие электромагнитных полей на массив горных пород

Воздействие электромагнитных полей промышленной высокой и сверхвысокой частот на горную среду используется для получения теплового и термомеханического эффекта, интенсификации химических реакций и процессов. Их сущность заключается в переводе электрической энергии в тепловую. Прогрев массива зависит от величины напряженности электрического поля. Поле создается с помощью электродов, опускаемых в скважины, расположенные по контуру подлежащего разогреву массива.

Способ применялся для разогрева серных руд Предкарпатья и битумов в Башкирии.

3.5. Гидравлические процессы при геотехнологии

Различают следующие гидравлические процессы : *гидрорасчленение, гидроподъем, гидроотбойка, гидротранспорт.*

Гидрорасчленение повышает проницаемость массива за счет разрыва пласта рабочей жидкостью под большим давлением.

Гидроподъем осуществляется за счет энергии нагнетаемого рабочего агента, вводимой в скважину энергии сжатого воздуха погружными насосами и гидроэлеваторами.

Гидроотбойка осуществляется струями рабочей жидкости высокого давления специальными скважинными гидромониторами с гибкими и телескопическими наконечниками.

Гидротранспорт – транспортировка разрушенной породы в виде пульпы – смеси твёрдого и жидкого в определенном соотношении.

Гидромониторная струя является рабочим органом для разрушения, смыва и подъема горной массы. Характеризуется размером отдельных структурных элементов, начальным давлением воды на вылете из насадки, силой давления на забой на различных расстояниях от насадки.

Существенное влияние на параметры струи оказывает соотношение плотностей струи и среды, в которой она движется. Свободная затопленная струя ($\rho_{ст} > \rho_{ср}$) используется при открытой и подземной разработках месторождений полезных ископаемых. Затопленная свободная струя ($\rho_{ст} = \rho_{ср}$) используется при скважинной гидродобыче, струйной зачистке днища кораблей, в реактивных двигателях и т. д. Несвободная затопленная струя ($\rho_{ст} < \rho_{ср}$) имеет место в эжекторных установках, при гидро-пескоструйной обработке призабойных зон нефте- и серодобычных скважин, при бурении скважин гидромониторными долотами.

Гидромониторные струи делят на: низкого (до 1 МПа), среднего (до 4 МПа), высокого (более 4 МПа) давления. Движение жидкости в струе характеризуется перемещением частиц воды при отсутствии твердых границ русла. Окончательное формирование струи происходит в насадке гидромонитора, назначение которой заключается в преобразовании статического давления воды в кинетическую энергию струи. По мере уменьшения сечения насадки и при постоянном расходе воды скорость ее увеличивается. Одновременно с этим увеличиваются потери напора в насадке, которые пропорциональны квадрату скорости потока. В конечном сечении насадки статическое давление, за вычетом потерь напора, переходит в скоростной напор.

Структура струи характеризуется геометрическими и гидравлическими параметрами. Условия формирования потока воды в подводящих каналах определяют начальные параметры струи. Завихрения потока в подводящем канале, неравномерность профиля, турбулентность на входе в насадку, возникновение кавитации при больших напорах ухудшают компактность струи и уменьшают ее дальнобойность. На параметры струи влияют вязкость и плотность среды, в которой распространяется

струи. Гидравлические и геометрические параметры определяют важнейшие показатели струи на контакте с разрушаемой породой: силу удара и удельное динамическое давление струи.

Увеличение гидростатического давления до глубины 200–300 м существенно ухудшает параметры струи.

Разрушение струей в основном применяется при разработке слабосвязных и рыхлых горных пород и реже – полускальных.

Размываемость породы определяется физико-геологическими факторами.

К гидравлическим факторам относят напор и расход.

К технологическим факторам относят условия воздействия струи на забой.

С увеличением пористости, трещиноватости, размокаемости и коэффициента фильтрации скорость размыва увеличивается, а с увеличением крепости, пластичности и коэффициента сцепления уменьшается. В то же время содержание различных фракций минеральных частиц в горной породе и их сцепление также характеризуют ее гидравлическую разрушаемость.

Сложность и недостаточная изученность явления размыва позволяют в настоящее время определять величину потребного напора струи и удельного расхода воды ориентировочно, а затем в производственных условиях уточнять.

Перемещение разрушенной струей гидромонитора горной массы к всасу выдачного устройства происходит по почве камеры самотечным или напорным потоком воды. Кроме того, самотечную доставку можно эффективно использовать на поверхности от добычных скважин до карты намыва или перекачных землесосов.

Самотечный транспорт возможен только при наличии определенного уклона. Подвижность смесей твердых частиц с жидкостями или газами зависит, прежде всего, от гранулометрического состава твердой фазы, ее плотности и от количественного соотношения фаз. По преимущественному содержанию частиц определенных размеров в смеси с водой транспортируемый материал условно делится на фракции по крупности: кусковую (более 50 мм), крупнозернистую (10–50 мм), мелкозернистую (2–10 мм), песчаную (0,25–2 мм), пылеватую (0,05–0,25 мм), иловую (0,005–0,05 мм) и глинистую (менее 0,005 мм).

В потоке кусковая и крупнозернистая фракции перемещаются скачкообразно и волочением по дну потока, а остальные фракции – во взвешенном состоянии.

Подъем руды по скважине может быть осуществлен *гидроэлеватором, эрлифтом или их комбинацией*. Транспортирование руды от добычной скважины по трубам осуществляется землесосом или загрузочным аппаратом. При гидроэлеваторном подъеме рабочая вода из насадки гидроэлеватора, создавая вакуум в приемной камере, засасывает поток гидросмеси и, смешиваясь с ним через диффузор, по трубам выдает ее на поверхность.

Эрлифтный подъем, несмотря на низкий КПД (10–30 %), широко применяется для откачки пульпы ввиду своей простоты, надежности и, главное, возможности свободного выноса абразивных частиц.

Различают следующие основные режимы (структуры) смеси: пузырьковый, поршневой, пенный, капельный. Кроме того, существует множество смешанных режимов. Структура смеси зависит от многих факторов, основными из которых являются расход газа, свойства жидкости, растворимость газа, диаметр подъемных труб, величина погружения эрлифта под динамический уровень откачиваемой жидкости.

До настоящего времени отсутствует строгая математическая теория эрлифта, которая позволила бы практически рассчитать все его параметры.

Землесосы являются наиболее распространенными аппаратами гидравлического транспортирования самых разнообразных горных пород и относятся к разновидности турбомашин, конструкция которых имеет специфику, обусловленную наличием твердого материала в транспортируемой гидросмеси.

Подъем гидросмеси из зумпфа до выходного отверстия рабочего колеса осуществляется за счет разности между атмосферным давлением и давлением расхода у входа в рабочее колесо. Выбрасывание гидросмеси в напорный трубопровод осуществляется за счет энергии, передаваемой потоку лопатками рабочего колеса через вал землесоса от двигателя.

Контрольные вопросы

1. *Дайте классификацию геотехнологических процессов.*
2. *Поясните сущность, основные закономерности и свойства процесса растворения.*

3. Поясните сущность, основные закономерности и свойства процесса выщелачивания.

4. Поясните сущность, основные закономерности и свойства процессов термического и термохимического процессов воздействия на массив горных пород.

5. Поясните сущность, основные закономерности и свойства процессов диспергирования и электромагнитного воздействия на массив горных пород.

6. Опишите гидравлические процессы геотехнологии: гидрорасчленение и гидроотбойку.

7. Опишите гидравлические процессы геотехнологии: гидроподъём и гидротранспорт.

4. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПРИ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

Весь технологический процесс геотехнологии можно подразделить на единичные производственные процессы, причем критерием их классификации может быть *цель*, для достижения которой предназначен производственный процесс.

Также следует учитывать, что ни технологическая схема, ни производственный процесс добычи полезного ископаемого геотехнологическими способами не могут быть адекватно описаны и объяснены вне системы трех активно взаимодействующих групп факторов: геолого-гидрологических, физико-химических и технолого-экономических.

4.1. Сооружение добычных скважин

Для бурения скважин обычно применяют станки, используемые для поискового бурения. Для сооружения скважин большой глубины используют станки шарошечного бурения типа СБШ, небольшой глубины при слабых покрывающих отложениях – станки шнекового вращательного бурения типа СБР, при породах мягких и средней крепости и глубине до 500 м – роторные буровые установки типа УРБ.

Проведены испытания по бурению относительно неглубоких скважин турбобурами конструкции ВНИИБТ. Были также опробованы различные методы бурения геотехнологических скважин высоконапорными струями воды.

Все буровые установки состоят из следующих основных узлов: вышки или мачты; механизмов подъема, вращения и промывки; двигателя с трансмиссией; генераторной и компрессорной установок; контрольно-измерительных приборов; превенторов; вспомогательного оборудования.

Удаление буровой мелочи осуществляют промывкой. В качестве промывочной жидкости используют глинистый раствор или воду. Циркуляцию промывочной жидкости осуществляют обычно с помощью поршневых насосов двойного действия.

Привод большинства буровых установок основан на дизельных двигателях или двигателях внутреннего сгорания. При необходимости бурения большого числа геотехнологических скважин, расположенных относительно недалеко друг от друга, с экологической, технологической и экономической точек зрения наиболее перспективным является электрический привод бурового станка.

Для предотвращения выброса жидкости и газа при бурении скважин в опасных по выбросам зонах устанавливают превенторы, герметизирующие пространство между обсадными и бурильными трубами. Противовыбросное оборудование обычно укомплектовывают превентором с плашками, патрубком с двумя отводами, колонным фланцем, уплотнительными кольцами, четырьмя задвижками высокого давления.

В комплект также входит оборудование для выполнения вспомогательных работ: глиномешалки, сита, гидроциклоны, желоба, средства очистки глинистого раствора, отопительная установка и др.

Породоразрушающие инструменты (долото) подразделяются по назначению на: сплошного бурения, колонкового бурения, специального назначения.

Долота сплошного бурения разрушают породу по всей площади забоя скважины. Долота колонкового бурения разрушают забой по кольцу с оставлением в центре забоя столбика породы – керна, используемого в дальнейшем после отрыва и извлечения на поверхность для получения геологоразведочных данных об условиях залегания полезного ископаемого и вмещающих пород.

Долота специального назначения используют при увеличении диаметра скважины (разбурировании), а также при различного рода аварийных работах. Различают следующие типы долот специального назначения: пикообразные, эксцентричные, ступенчатые, долота-расширители, долота-фрезы.

При бурении скважин в мягких породах используют лопастные долота, а в породах средней крепости и крепких – шарошечные. При бурении скважин по весьма крепким горным породам используют алмазные и фрезерные, армированные твердым сплавом долота, работающие на принципе истирания.

Лопастные долота, работающие на принципе резания или скалывания, бывают двух- или трехлопастными.

Шарошечные долота, работающие на принципе дробления и скалывания, чаще всего состоят из трех конических шарошек.

Бурильные трубы служат для передачи вращательного момента и нагрузки долоту и подачи промывочной жидкости. Соединение бурильных труб осуществляется с помощью замков и ниппелей. Используют обычно телескопические бурильные трубы. Бурильные трубы имеют шестигранную или квадратную форму для передачи вращения колонне от ротора бурового станка. Вертикальность скважин обеспечивается *центратором*.

При бурении скважин при подземной газификации углей особенность процесса состоит в том, что скважины относительно небольшой глубины, но большого диаметра. Большинство скважин проводится под углом. Вертикальные скважины бурят установкой типа УИТ-40, а наклонные – УНБ-ЗИФ-1200 АМ.

Установка УИТ-40 смонтирована на колесно-гусеничном прицепе, а установка УНБ – на металлическом рамном основании в виде саней.

Угол наклона вышки УНБ может изменяться от 37° до 60°. В России освоен метод бурения наклонно-горизонтальных скважин (скважины с горизонтальным окончанием) на сравнительно небольшую глубину (до 300 м). Выбор конструкции скважины зависит главным образом от применяемого геотехнологического способа и назначения скважины. Существенное влияние при этом оказывают горно-геологические факторы: глубина, мощность водоносных горизонтов, мощность залежи полезного ископаемого.

Конструкция скважины включает в себя:

- приспособление для задания направления, предназначенное для крепления устья скважины;
- кондуктор, перекрывающий верхнюю часть скважины и обеспечивающий изоляцию водоносных горизонтов, а также вертикальность скважины;

- колонну обсадных труб, которая опускается до залежи.

Приспособление для задания направления при большой глубине скважины тщательно центрируют и надежно закрепляют, а при скважинах небольшой глубины часто вообще не применяют.

Кондуктор обязательно цементируют с подъемом цемента до устья скважины.

При обнаружении сильных водопритоков или обвалов стенок скважины опускают промежуточную колонну обсадных труб, а дальнейшую обсадку ведут трубами меньшего диаметра.

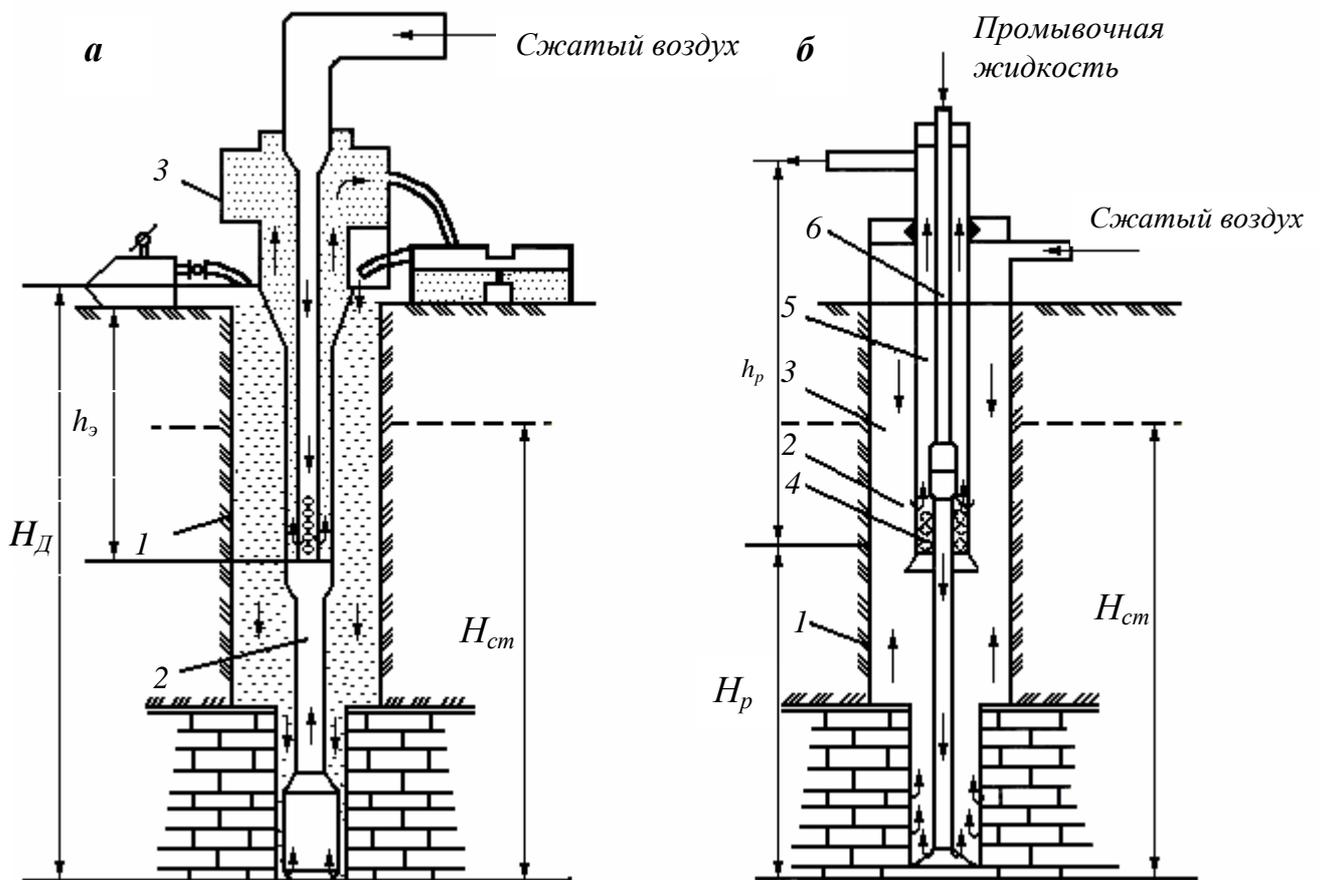


Рис. 4.1. Схемы бурения, используемые при бурении геотехнологических скважин с: *а* – обратновсасывающей промывкой; *б* – с частичной аэрацией столба промывочной жидкостью

Весьма важным при бурении скважин является удаление буровой мелочи. Продувка скважин сжатым воздухом практически не используется.

Обычно при бурении геотехнологических скважин используют две схемы бурения (рис. 4.1):

- с обратновсасывающей промывкой;
- с частичной аэрацией столба промывочной жидкостью.

Сущность схемы бурения с обратновсасывающей промывкой заключается в следующем: с глубины 60–80 м эрлифтом, находящимся внутри колонны труб 1, непрерывно откачивают промывочную жидкость; при этом в результате полученного разрежения по кольцевому зазору между буровыми трубами и стенками скважины промывочная жидкость поступает к долоту 2, захватывает буровую мелочь и через отверстие в последнем поступает внутрь колонны буровых труб; через приставку к сальнику-вертлюгу 3 шлам выносится на поверхность, не кольматируя (не заштыбовывая) забой скважины. Если водоприток из обуриваемых горных пород недостаточен, в скважину необходимо долить чистую воду.

Схема бурения с частичной аэрацией столба промывочной жидкостью наиболее широко применяется на практике. При этом сохраняется обычная технология бурения с промывкой и используются компрессоры низкого давления (0,6–0,8 МПа). В кольцевой зазор между обсадной 1 и промежуточной 2 колоннами нагнетают поток сжатого воздуха 3 (см. рис. 4.1.б). Через отверстия в нижней части промежуточной колонны (смеситель) 4 воздух поступает внутрь ее. Аэрированный поток промывочной жидкости 5 проходит по зазору между колонной буровых труб 6 и промежуточной колонной, откачивая тем самым буровую мелочь на поверхность. Промывочную жидкость подают по отверстию в ведущей буровой трубе к шарошечному долоту. Этот способ можно применять с использованием компрессоров низкого давления при глубине статического уровня пластовых вод не более 45 м.

Для утяжеления раствора используются добавки порошка барита, гематита, магнетита, пиритовых огарков, колосниковой пыли в количестве от 3,5 до 4,6 г/см³. Для повышения качества местных глин используют поверхностно-активные (ПАВ) и химически активные (ХАВ) вещества.

Утяжелители растворов применяют для того, чтобы избежать выброса воды, пара или газа из скважины.

При бурении скважины по полезному ископаемому обычно осуществляют отбор керна. При этом стремятся нанести ему наименьший вред. При бурении по соли в качестве промывочной жидкости исполь-

зуют крепкий раствор соли, при бурении по серной залежи – чистую воду.

Иногда при бурении происходит интенсивное поглощение промывочной жидкости стенками скважины, что сопровождается обрушением стенок скважины при неустойчивых породах.

Для борьбы с поглощением бурового раствора стенками скважины используют различные специальные реагенты: структурообразователи, гельцемент, быстросхватывающиеся смеси и т. п.

Структурообразователи увеличивают вязкость промывочной жидкости. Такой раствор, проникая в трещины и поры массива, закупоривает их. В качестве структурообразователей обычно используют: жидкое стекло – до 5 %, кальцинированную соду – до 6 %, инертные добавки (опилки, рисовую шелуху, кордное волокно, слюду, торф, паклю и т. п.) – до 3 % и более.

Гельцемент представляет собой смесь глинистого раствора с цементом в пропорции примерно 1 : 1. Гельцемент закачивают в скважину, продавливают до забоя и через сутки возобновляют бурение.

При сильной закарстованности залежи необходимо не только предотвратить поглощение раствора, но и заполнить наиболее крупные карстовые полости тампонажным раствором в радиусе до 10 м. В качестве тампонажного раствора обычно используют глиноцементный раствор, приготавливаемый из 300 кг цемента на 1 м³ глинистого раствора и инертных наполнителей.

После вскрытия залежи скважина обсаживается и цементируется. После ожидания затвердевания цемента продолжается бурение на всю мощность залежи с небольшим перебором в подстилающие породы. Таким образом, сооружение скважин сводится к выполнению следующих технологических операций:

- бурение и обсадка скважин: бурение, спуск обсадных труб; бурение по продуктивному пласту; подвозка воды и глинистого раствора; подвозка обсадных труб, горюче-смазочных материалов (ГСМ), бурового инструмента;
- цементирование обсадных колонн: установка устьевого оборудования; приготовление и закачка цементного раствора; подвозка технической воды; подвозка цемента;
- закачивание скважин: спуск и подъем насосно-компрессорных и эрлифтных труб, пакеров; откачка; нагнетание, кислотная обработка, гидроразрыв; подвозка воды и кислоты для нагнетания;

- оборудование скважин технологическими колоннами труб: спуск рабочих колонн труб; подвозка труб; опробование герметичности рабочих колонн и задвижек.

Крепление скважин включает два технологических процесса: спуск обсадных труб и их цементацию.

Обсадные трубы обычно изготавливают цельнотянутыми или цельнокатаными. Соединяются они между собой муфтами или сваркой.

Перед спуском обсадных труб каверномером исследуют профиль скважины и определяют потребное количество цементного раствора.

Цементация скважины является наиболее ответственным процессом. Перед цементацией затрубное пространство промывают водой или глинистым раствором. Цемент закачивают с помощью цементировочного агрегата. При сооружении скважин в соляных пластах цементационный раствор приготавливают на насыщенном растворе соли. По окончании цементации скважину оставляют в покое на 16–24 часа для схватывания цементного раствора. Для интенсификации или замедления этого процесса используют ускорители или замедлители затвердевания. Для улучшения цементующего состава иногда в него добавляют 30–40 % кварцевого песка тонкого помола. В качестве ускорителей используют хлористый натрий и хлористый калий, а в качестве замедлителя – сульфит-спиртовую барду или карбоксиметил-целлюлозу.

Опрессовка скважин – это испытание их на герметичность. Проводят ее в два этапа. Первый этап – после затвердевания цемента, но до разбуривания цементного башмака под давлением в 2–3 раза выше рабочего. Второй этап – после разбуривания цементного башмака в трубе и под колонной обсадных труб при давлении в 2 раза больше рабочего.

Испытания производят нагнетанием воды. После достижения заданного давления закрывают вентиль и выжидают в течение одного часа. Если давление падает, цементацию повторяют.

После этого приступают к оборудованию добычных скважин. Под оборудованием добычных скважин понимается спуск в них колонн эксплуатационных труб.

Для различных геотехнологических способов используют различные виды оборудования. Набор эксплуатационных труб опускается до забоя скважины, опирается на него или подвешивается на оголовке скважины.

Эксплуатационные трубы обычно перфорированы. Длина участка перфорации зависит от мощности залежи. Диаметр отверстий составляет 18–20 мм, они располагаются в шахматном порядке на расстоянии 80–100 мм.

Диаметр эксплуатационных труб принимают максимально возможным, так как от этого зависит производительность добычной скважины. Оборудование скважин осуществляют непосредственно перед пуском во избежание коррозии. Эксплуатационные трубы обычно соединяют сваркой.

Устья скважин также проходят эту стадию, заключающуюся в обвязке колонн труб устьевой арматурой, которая герметизирует устье и обеспечивает возможность отдельного движения рабочих агентов. Конкретный набор оборудования скважин зависит от способа геотехнологии и определяется проектом.

От 30 до 70 % скважин не готовы после испытаний на герметичность обеспечить требуемую приемистость из-за кольматации призабойной части. Требуется проводить гидроразрыв, солянокислотную ванну, гидроперфорацию или торпедирование, что увеличивает стоимость сооружения скважины на 20 %.

Перед сдачей скважины проводят комплекс ее измерений, включающий:

- электрический каротаж – измерение кажущегося удельного сопротивления и потенциала естественного электрического поля, на основании чего можно судить о гидравлической проницаемости горных пород;
- термокаротаж – выделение слоев пород с различными температурными свойствами, определяющими литологический состав;
- кавернометрия – определение истинного диаметра скважины для косвенной оценки пористости и трещиноватости;
- инклинометрия – замер кривизны скважины для определения положения забоя скважины в пространстве.

Все данные измерений систематически фиксируются, составляется план горных работ, где указывается порядок бурения и сдачи скважин в эксплуатацию.

4.2. Производство рабочих агентов при геотехнологии

Оборудование для производства рабочих агентов представлено различными насосными агрегатами для создания высокого напора, на-

гревательными установками для приготовления горячей воды и пара, компрессорными и воздуходувными устройствами, установками для приготовления растворов щелочей и кислот необходимой концентрации, регенерационными установками для рабочих сред. Обычно сооружают стационарные или полустационарные пункты для подготовки рабочих агентов, а к каждой скважине прокладывают трубопроводы. Трубопроводы монтируют с помощью трубоукладчиков и быстроразъемных соединений.

Для каждого способа геотехнологии характерна своя технологическая схема производства рабочих агентов. При скважинной гидродобыче основной элемент этой схемы – обратное водоснабжение. Добытое полезное ископаемое складывают на карте намыва, воду перепускают в приемный бассейн и вновь насосами подают к добычным агрегатам.

Общая часовая потребность воды определяется произведением заданной часовой производительности промысла на удельный расход воды плюс ее потери на отдельных звеньях схемы. Обычно потери составляют 15–20 %.

При разработке конкретного месторождения на основании опытных работ определяется необходимое давление струи на насадке гидромонитора для разрушения руды. В соответствии с конкретным проектом устанавливается длина магистрального и участковых водоводов, их профили со всеми высотными отметками. Определяются общие потери напора в трубопроводе. Местные потери напора (в задвижках, на поворотах, стыках и т. д.) составляют около 10 % от общих потерь. Общий напор определяется как сумма необходимого давления для разрушения и всех потерь. По расчетным параметрам расхода и напора определяется тип насоса. Водоводы сооружают из стальных труб.

Весьма важной задачей при скважинной гидродобыче является осуществление мероприятий по предотвращению поверхностных и подземных (фильтрационных) утечек воды. При подземной выплавке серы основным рабочим агентом является горячая вода. Принципиально возможны несколько схем производства горячей воды: с применением свежего пара от паровых котлов низкого давления, с применением паровых котлов высокого давления и прямоточных водогрейных котлов. Выбор котлооборудования основывается на технико-экономических расчетах с учетом условий каждого конкретного случая.

При подземной выплавке серы используют также сжатый воздух. Для его получения организуется компрессорное хозяйство, состоящее из обычных нагнетательных компрессоров.

При глубине залегания до 100 м целесообразно применять передвижные компрессоры с давлением до 0,98 МПа, при глубине до 300 м – двухступенчатые компрессоры с давлением до 2,45 МПа, при большей глубине – компрессоры с давлением 3,43–4,90 МПа.

У места излива откачиваемой из недр серы устанавливают газовые сепараторы (трапы).

Схема газового сепаратора приведена на рис. 4.2. Он представляет цилиндр с обогреваемой паровой рубашкой 2 и клапаном для сброса воздуха, включающего запорную иглу 1 и поплавков 3. Установка газового сепаратора обеспечивает отделение серы от воздуха, воды и пара и облегчает транспортирование жидкой серы, так как уменьшает в 30–50 раз объем транспортируемой массы и уменьшает расход сжатого воздуха.

Разводка теплоносителя от котельной до добычных скважин и далее до забоя осуществляется по металлическим трубам различных диаметров. Вода, нагретая до 165 °С, из-за содержания в ней свободного кислорода в смеси с серой исключительно агрессивна, поэтому для сооружения эрлифта используются дюймовые трубы из нержавеющей стали. На других технологических звеньях возможно использование толстостенных труб (9–11 мм) из обычных сталей. Важной задачей является переход на эмалированные трубы, способные работать в агрессивной среде при температуре 160–170 °С.

В связи с применением при подземном выщелачивании сернокислотного растворителя трубы, используемые для его транспортирования по поверхности и в скважине, должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать высокой коррозионной устойчивостью к слабым растворам кислот;
- иметь необходимую прочность при внутренних и внешних нагрузках;
- допускать возможность повторного использования;
- соединения отдельных труб или плетей должны выполняться в минимальное время при сохранении герметичности;
- серийно изготавливаться в промышленных масштабах;
- иметь относительно невысокую стоимость.

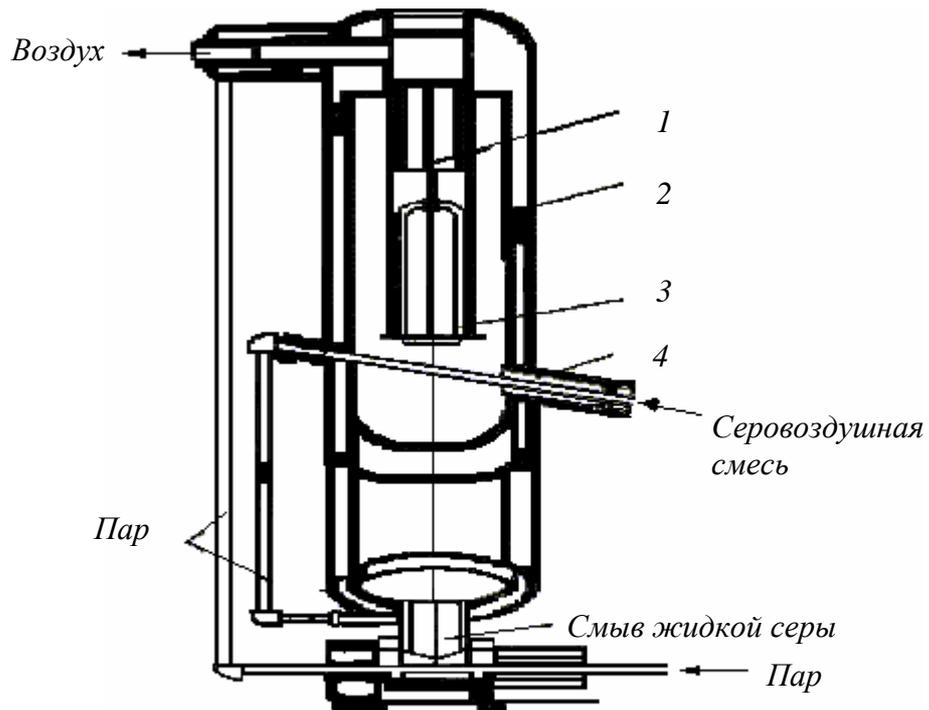


Рис. 4.2. Схема газового сепаратора

Были испытаны следующие виды труб: пластмассовые, полиэтиленовые, полипропиленовые, поливинилхлоридные, винипластовые, металлические (из нержавеющей стали), биметаллические (из рядовой стали с внутренним антикоррозионным покрытием), стеклопластиковые, фанерные, асбоцементные, металлопластовые (полиэтилен, армированный металлической сеткой). Всесторонние исследования показали, что лучшими являются полиэтиленовые трубы низкой и высокой плотности (ПНП и ПВП). Они изготавливаются четырех типов: легкого (Л), среднелегкого (СЛ), среднего (С), тяжелого (Т). Из полиэтилена низкой плотности обычно изготавливают трубы диаметром до 160 мм, а из полиэтилена высокой плотности – до 630 мм. Специально для подземного выщелачивания выпускают трубы из ПВП сверхтяжелого типа (СТ) диаметром 110, 114, 160 и 210 мм с толщиной стенок 18 мм.

Для соединения полиэтиленовых труб используют сварку встык и резьбовое соединение.

Кажущаяся простота сварки встык не всегда оправдана. Из-за нестабильности характеристик труб даже одной партии при ручной сварке часто возникают температурные трещины, приводящие к нарушению герметичности шва. Более перспективна сварка с помощью специаль-

ного сварочного оборудования типа УСВТ-2 и УСГТ-2, обеспечивающего строго регулируемые параметры режима сварки (температура, давление, скорость осадки и др.). Эти установки приспособляются для сварки горизонтальных и вертикальных трубопроводов.

При выборе типа и конструкции соединения труб исходят из следующих основных требований:

- конструкция и материал соединения должны быть не менее устойчивыми, чем тело трубы, к воздействию осевых нагрузок, внутреннего и наружного давления при сохранении герметичности;
- качественные и технологические показатели соединения не должны снижаться при температуре от -30 до $+60$ °С; соединение должно быть коррозиестойким к 5–10 процентному раствору H_2SO_4 и концентрированной HCl .

4.3. Поверхностное обслуживание скважин

На предприятии, отрабатывающем месторождение геотехнологическим способом, должно быть оборудование для обслуживания эксплуатационных скважин и монтажа технологических трубопроводов: специальные самоходные агрегаты, манипуляторы, стационарные монтажные вышки, подъемники и т. п.

Именно степень механизации производственных процессов по обслуживанию добычных скважин определяет уровень эксплуатационных затрат на единицу добытой массы полезного ископаемого.

Монтаж наземных технологических трубопроводов обычно ведут с помощью самоходных трубоукладчиков.

Конкретный набор оборудования для поверхностного обслуживания скважин зависит от применяемого геотехнологического способа и учитывает все его технологические, экологические и экономические особенности. Оборудование, устанавливаемое на поверхности для обслуживания геотехнологической скважины, называется устьевым, а располагаемое в скважине – забойным.

4.4. Оборудование для добычи полезного ископаемого геотехнологическими способами

Добычное оборудование используют двух типов для:

- отделения от массива и доставки полезного ископаемого к забою скважины;

- подъема полезного ископаемого на поверхность.

К первому типу относят: колонны перфорированных труб; скважинные гидромониторы; скважинные нагреватели (горелки, электронагреватели), вибраторы, скважинные излучатели и др.

Ко второму типу относят: подъемники, эрлифты, гидроэлеваторы, погружные насосы, колонны эксплуатационных труб.

Тип применяемого добычного оборудования определяется способом разработки. Забойное оборудование включает колонну эксплуатационных труб, всевозможные перфорированные фильтры, пакеры и, в отдельных случаях (например, при скважинной гидродобыче), исполнительные органы, предназначенные для отделения полезного ископаемого от массива.

Конкретный набор добычного оборудования может быть самым различным не только при использовании различных методов, но и при отработке разнотипных месторождений одним и тем же методом.

Так, при подземной выплавке серы эксплуатационная колонна включает три концентрических става труб: диаметром 6"–8" – для подачи воды; диаметром 3"–4" – для выдачи полезного ископаемого; диаметром 1" – для подачи сжатого воздуха, используемого для транспортирования полезного ископаемого. В забойной части ставов установлен пакер, отделяющий перфорацию для подвода теплоносителя в пласт от перфорации для поступления в став расплавленной серы.

Аналогично выглядит и забойное оборудование при подземном растворении солей.

Выбор оборудования для скважинной гидродобычи зависит от прочностных характеристик полезного ископаемого, глубины залегания и гидростатических условий. Гидродобычной агрегат – гидромонитор – может быть: телескопическим, поворотным, на гибком трубопроводе и т. п. Само забойное оборудование может опускаться в одну или две скважины. Оборудование скважины для подземного выщелачивания разделяют на нагнетательное и откачное.

Эксплуатационные трубы изготавливают из кислотоустойчивых материалов. В скважинах располагают трубчатые фильтры с круглой или щелевой перфорацией.

Процесс подъема полезного ископаемого может происходить:

- энергией нагнетаемого рабочего агента;
- вводимой в скважину энергией сжатого воздуха или газа;
- погружными насосами;

- гидроэлеваторами.

Наиболее простым и эффективным средством подъема является нагнетательный эрлифт. Воздух подается по воздухопроводу, а продукт поднимается по кольцевому пространству между воздухоподающей и обсадной трубами. Нижняя часть воздухопровода перфорирована.

Достоинствами эрлифтного подъема являются простота, надежность в работе, отсутствие движущихся частей, возможность свободного выноса частиц пород, сопутствующих продуктивным растворам.

Недостатками эрлифтного подъема являются относительно низкий КПД (не более 10 %) и необходимость наличия специального компрессорного оборудования.

Физика процесса эрлифтного подъема связана с подъемом гидро-смеси за счет энергии расширения газа, разности скоростей жидкой и газообразной фаз, работы пузырька газа как негерметичного поршня, снижения удельного веса смеси, поднятия жидкости по закону сообщающихся сосудов. Существует несколько взглядов на процесс откачки жидкости эрлифтом, тем не менее строгая математическая теория эрлифта, позволяющая практически рассчитать все его параметры, до сих пор отсутствует. Это объясняется нестабильностью структуры газожидкостного потока.

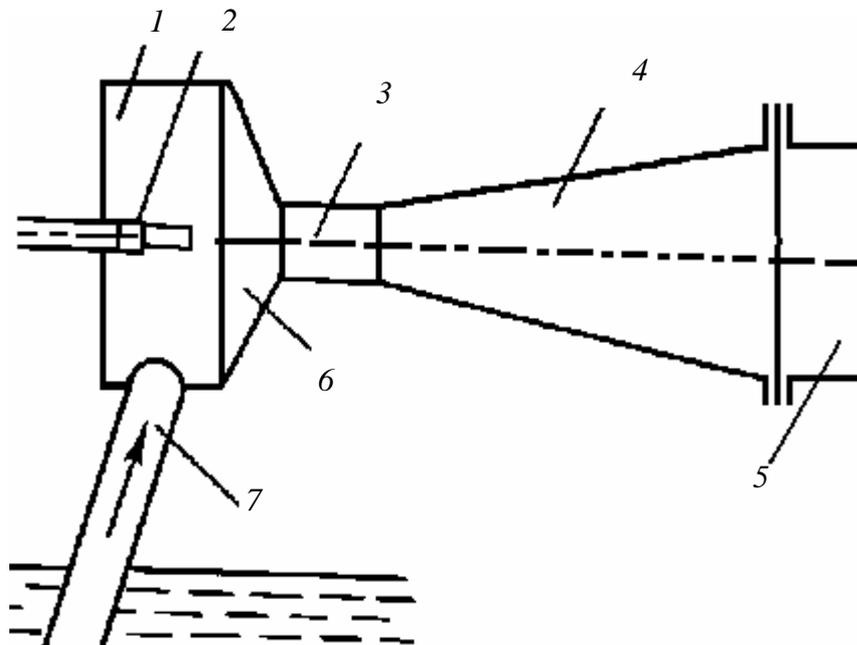


Рис. 4.3. Принципиальная схема гидроэлеваторного подъема

Принципиальная схема гидроэлеваторного подъема показана на рис. 4.3. В центральном гидроэлеваторе напорная вода в камеру смешения 1 поступает из насадки 2. При этом в приемной камере создается вакуум, за счет которого засасывается поток гидросмеси, который смешивается с потоком воды в смесительной камере 3. Смесь через диффузор 4 поступает в нагнетательный трубопровод 5 и по нему выдается на поверхность. Поток гидросмеси засасывается в приемную камеру и поступает в конфузор 6 через всасывающий патрубок 7, опущенный в гидросмесь.

Эффективность работы гидроэлеватора определяется соотношением расхода перекачиваемой и рабочей жидкостей, а также площадями поперечного сечения камеры смешения и всасывающей трубы. Кроме того, на КПД гидроэлеватора оказывает влияние подпор перекачиваемой жидкости при работе в затопленной добычной камере, а также крупность транспортируемой руды. Экспериментально установлено, что КПД гидроэлеваторного подъема не превышает 0,4.

Подъем руды по скважине часто осуществляется комбинацией гидроэлеватора и эрлифта.

В 1971–1976-е годы были проведены большие работы по созданию и изготовлению погружных скважинных насосов в коррозиестойком исполнении. Были разработаны конструкции, изготовлены, испытаны в производственных условиях и приняты к серийному производству несколько типоразмеров погружных скважинных электрических насосов: УЭЦНК4-100-80, УЭЦНК-160-80, УЭЦНК6-360-150, ЭЦВ6-25-140ХГ и др.

Эти насосы имеют КПД 36–37 % и могут откачивать из скважин продуктивные растворы, содержащие до 10 % серной кислоты и 0,1 г/л механических примесей.

Испытания и опытная эксплуатация показали, что дебит добычных скважин при применении погружных насосов, по сравнению с эрлифтами, возрастает в 1,5–2 раза, расход электроэнергии снижается в 4–6 раз. Насосы облегчают автоматизацию процесса подъема растворов и устраняют их распыление на устьях откачных скважин. Особенно эффективна работа погружных насосов в зимнее время, т. к. устраняется возможность промерзания трубопроводов со сжатым воздухом.

4.5. Управление массивом горных пород при геотехнологии

Управление горным давлением при геотехнологии осуществляется выбором параметров технологии, системой расположения выработок, временем отработки и т. п.

Управление массивом горных пород при геотехнологии осуществляют в двух направлениях:

- 1) программируемое сдвигание массива горных пород в процессе отработки залежи;
- 2) изменение характеристик проницаемости массива горных пород перед началом добычных работ.

Геотехнологические способы делят на две группы по принципу извлечения полезного ископаемого: путём селективной выемки, предусматривающей полную выемку пласта полезного компонента, и полной выемки.

Характер проявления горного давления при этих способах различен. При селективной выемке возможны два варианта:

- 1) горное давление не оказывает существенного влияния (извлекается небольшая доля полезного ископаемого по объему);
- 2) горное давление оказывает существенное влияние, т. к. извлекается ощутимый процент полезного ископаемого.

При использовании способов, при которых извлекается пласт на полную мощность, также выделяют два варианта:

- 1) призабойное пространство заполнено флюидами под высоким давлением;
- 2) с полным обрушением пород кровли.

Самым важным параметром геотехнологии является размер камер, так как от этого зависят извлечение, степень сдвигания массива, параметры технологического оборудования и т. п.

Наиболее актуальны процессы управления горным давлением при скважинной гидродобыче полезных ископаемых, т. к. пласт разрушается и отрабатывается на полную мощность.

Деформация кровли при скважинной гидродобыче начинается с плавного прогиба. Затем, при увеличении пролета камер (около 14 м), начинается постепенное расслоение кровли и образование трещин. Дальнейшее увеличение размеров пролетов приводит к обрушению кровли. При относительно небольшой мощности покрывающих пород свод обрушения достигает поверхности. Однако уже при глубине 40 м изменения на поверхности практически не наблюдаются.

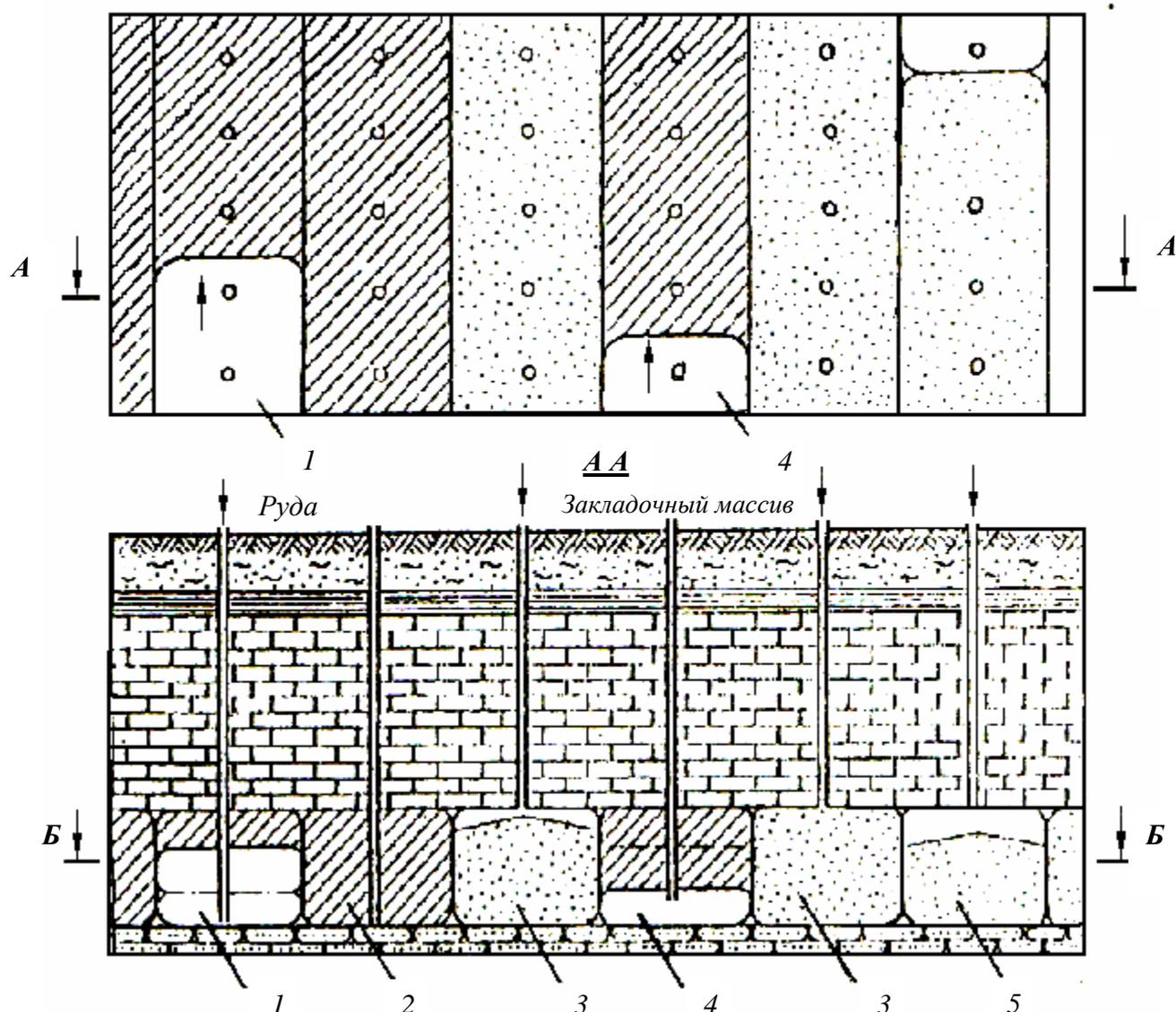
Б-Б

Рис. 4.4. Принципиальная схема отработки залежи с закладкой выработанных блоков

Как показал опыт эксплуатации скважинной гидродобычи, при ширине камеры 14 м междукамерный целик оказывается устойчивым при ширине 4 м при любой мощности покрывающих пород.

Устойчивая площадь обнажения кровли составляла при скважинной гидродобыче 280 м^2 ($20 \times 14 \text{ м}$).

Форма мульды сдвижения поверхности в плане представляет собой симметричную фигуру – воронку, образовавшуюся в результате отработки скважины.

Круглая форма мульды сдвижения свидетельствует о равномерном оседании поверхности. Скорость оседания поверхности в мульде ко-

леблется от 0,6 до 21,6 мм/мес. Максимальные скорости оседания наблюдались через 2 месяца по окончании отработки камеры, после чего идёт спад процесса сдвижения. Таким образом, в результате отработки скважин и образования площадей обнажения вся налегающая толща до поверхности прогибается плавно, без расслоения. Предварительный угол сдвижения составляет около 43° .

Имеются предложения по заполнению отработанных камер закладочным материалом, представляющим собой песок, дроблёную породу или отходами производства. Принципиальная схема отработки залежи с закладкой выработанных блоков приведена на рис. 4.4.

Отработка залежи фосфоритсодержащих песков ведётся блоками. Разрабатываемый блок 1 вытянут и отработывается через ряд геотехнологических скважин на всю длину блока. Отбойка руды ведётся слоями в восходящем порядке. Расположенный рядом блок образует целик 2.

Следующий за целиком блок и блок, расположенный за очередным целиком, образуют закладываемые блоки 3. После заполнения последних закладочным материалом приступают к слоевой разработке целиков 4. При необходимости полностью исключить сдвижение массива производят закладку отработанных целиков 5.

Особенно эффективен метод управления массивом горных пород закладкой, когда в качестве закладочного материала используются отходы производства и вредные вещества.

Размещение захороняемых отходов в подземной полости с помощью жидкости, с превосходящей их плотностью, обеспечивает строгое постоянство равномерности распределения всплывающего в ней материала как по всему зеркалу ее поверхности, так и под ним. Материал автоматически сохраняет свою горизонтальность на любой отметке налива суспензии. В сочетании с низкой температурой кипения жидкой фазы, формирующейся по мере опускания мениска суспензии по скважине к кровле полости, штабель не только воспроизводит ее форму, но и оказывается в конечном итоге осушенным теплом земных недр. Полость заполняется закладываемым материалом под самую кровлю, т. к. он находится на плаву. Это обеспечивает исключение сдвижения массива горных пород из-за неполноты заполнения полости, что очень важно при захоронении радиоактивных и токсичных отходов.

Для создания фильтрационных каналов в горном массиве, обеспечивающих движение рабочих и продуктивных флюидов, используют гидроразрыв пласта. Он приводит к хрупкому разрушению массива с

расширением старых и образованием новых трещин. Для закрепления трещин в них нагнетают твердый материал, например кварцевый песок.

Особенно важно использование этого метода при подземном выщелачивании урана. Повышение проницаемости массива позволяет увеличить расстояние между добычными скважинами. Существует большое число методов повышения проницаемости массива. Основными из них являются различного рода воздействия на залежь: пневмо- и гидрорасчленение; использование энергии криогенных газов в различных режимах и сочетаниях; использование энергии взрыва; физико-химическое, электрическое, виброволновое и акустическое воздействие. Эти способы находятся на различной стадии разработки, но наиболее освоено гидрорасчленение.

При подземном выщелачивании необходимо управлять потоками рабочей жидкости, чтобы исключить ее проникновение за контуры обрабатываемой залежи и не допустить фильтрацию подземных вод в рабочую зону. Для предотвращения растекания продуктивных растворов и фильтрации подземных вод используют противофильтрационные завесы, которые могут сооружаться как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Для сооружения вертикальных барьеров бурят ряд барражных скважин, которые можно располагать как вдоль, так и поперек залежи. Для сооружения горизонтальных барьеров барражные скважины бурятся по площади до места возведения завесы. Для создания завесы в скважины нагнетается твердеющий материал (цемент, синтетические смолы и др.). Химические барьеры создаются нагнетанием в скважины веществ, которые затвердевают после взаимодействия друг с другом и пластовой водой.

4.6. Транспортировка полезного ископаемого от места добычи до места переработки

Конкретная схема транспортирования, оборудование и его характеристики определяются применяемым геотехнологическим способом и условиями его применения.

Транспортирующее оборудование предназначено для доставки продуктов обычно от скважины до места складирования или переработки. Такое оборудование представлено насосными агрегатами, компрессорными и газоздушными агрегатами, сгустителями, классификаторами, обезвоживателями, трубами, арматурой и т. п.

При подземной выплавке серы вся разводка трубопроводов для доставки добытого полезного ископаемого от скважины до склада осуществляется по металлическим трубам различных диаметров. Сера исключительно агрессивна и быстро выводит оборудование из строя.

При скважинной гидродобыче (СГД) возможны два способа доставки разрушенной руды напорной водой: самотечный по руслу произвольной формы, по лоткам и трубам; принудительной гидромониторной струей.

Самотечный транспорт применяется для подачи гидросмеси руды от добычных агрегатов к участковым землесосным установкам. Обычно применяются лотки трапецеидального сечения. Проблемы гидротранспорта резко возрастают при понижении температуры окружающего воздуха ниже 0° С.

При подземном выщелачивании вся трубная разводка собирается из полиэтиленовых или пластмассовых труб или других кислотоустойчивых материалов.

При подземной газификации после предварительной очистки и переработки технологический газ отводится по трубам, где находится под высоким давлением.

Иногда возникает необходимость в частичной переработке добытого продукта, его очистке от вредных примесей, предварительном обогащении и т. п. Эти процессы осуществляются на специальном оборудовании, набор которого зависит от конкретного геотехнологического способа разработки. К этой группе относят также погрузочное и складское оборудование: экскаваторы, грейферные грузчики, краны и т. п.

4.7. Комплексная автоматизация производственных процессов геотехнологии

К средствам контроля технологического процесса геотехнологии и управления им относят:

- контрольно-измерительные приборы (расходомеры, термопары, манометры, дифманометры и др.);
- средства автоматизации (датчики, усилители, преобразователи, исполнительные механизмы);
- автоматизированные системы управления (АСУ).

Технические средства АСУ включают контрольно-измерительные приборы и дистанционно управляемые исполнительные механизмы, а

также средства автоматической обработки данных (вычисления, сбора, хранения и передачи информации).

Особенно важна проблема комплексной автоматизации производственных процессов при подземной выплавке серы, т. к. необходимо на всем технологическом цикле поддерживать температурный режим в четко ограниченном диапазоне.

В технологической структуре комплекса подземной выплавки серы выделяют следующие основные звенья: участок водоснабжения; участок водоподготовки; участок подготовки горячей воды и пара; компрессорная; контрольно-распределительная станция; добычной комплекс; склад серы; вспомогательные участки. Координация работы всех этих звеньев должна быть жестко увязана и обеспечена диспетчерской службой, сосредоточивающей в себе все каналы подсистем централизованного контроля и учета, оперативной связи и т. д.

Целесообразность автоматизации технологических процессов геотехнологии определяется экономической эффективностью.

Контрольные вопросы

1. *Опишите область применения бурильных станков и установок при геотехнологии.*
2. *Опишите основные узлы и классификацию бурильных станков и установок, применяемых при геотехнологии.*
3. *Опишите принципиальную конструкцию скважин при геотехнологии.*
4. *Опишите схемы бурения скважин и особенности бурения скважин в различных условиях.*
5. *Какие операции производятся в процессе сооружения скважин?*
6. *Какие операции и в какой последовательности производятся при различных испытаниях скважин?*
7. *Какие операции производятся при сдаче скважин в эксплуатацию?*
8. *Какое оборудование используют при производстве рабочих агентов при геотехнологии?*
9. *Опишите технологическую схему производства рабочих агентов при скважинной гидродобыче.*
10. *Опишите технологическую схему при подземной выплавке серы.*

11. Какие требования предъявляют к трубам и их соединениям при геотехнологии?

12. Какие требования предъявляют к оборудованию и обслуживанию скважин на поверхности?

13. Какое добычное оборудование используют для отделения полезного ископаемого от массива и его транспортировки?

14. Какое оборудование используют для подъёма полезного ископаемого при геотехнологии, каковы принципы его действия?

15. Перечислите параметры, способы и варианты управления горным давлением при геотехнологической добыче.

16. Опишите технологию управления горным давлением полным обрушением при геотехнологической добыче.

17. Опишите технологию управления горным давлением при заполнении камер под давлением.

18. Какие требования предъявляют к транспортировке полезного ископаемого по поверхности при различных геотехнологических способах добычи?

5. ВСКРЫТИЕ И СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

5.1. Геотехнологические способы вскрытия месторождений

Под вскрытием месторождения понимается проведение (проходка) выработок, открывающих доступ с поверхности к рудному телу или к пластам полезного ископаемого и обеспечивающих возможность проведения подготовительных работ.

Выработки, обеспечивающие доступ к месторождению полезного ископаемого с поверхности земли и служащие для его подготовки и разработки, называют вскрывающими.

Основная вскрывающая выработка при геотехнологии – скважина. Скважины обеспечивают также подготовку залежи к разработке и служат для транспортировки рабочих и продуктивных флюидов.

По своему назначению все вскрывающие скважины подразделяются на добычные и вспомогательные. Вспомогательные скважины могут быть разведочными, водоотливными, оценочными и контрольными. Добычные скважины предназначены для добычи полезного ископаемого и могут быть вертикальными, наклонными и наклонно-

горизонтальными. Они обычно оборудуются эксплуатационными колоннами труб для доставки к продуктивной залежи рабочего агента и извлечения из недр полезного ископаемого. Диаметр добычной скважины определяется конструктивными размерами ее оборудования, а глубина – глубиной залегания полезного ископаемого.

Наклонно-горизонтальные скважины позволяют отрабатывать на одну скважину большие запасы, чем вертикальные.

При большинстве геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых скважины являются одновременно вскрывающими, подготовительными и нарезными выработками, т. к. они вскрывают месторождение, подготавливают его к разработке и используются для добычи полезного ископаемого.

Добычные скважины обычно одинаковы, отрабатывают один ограниченный участок месторождения, поэтому для оценки вскрытия, подготовки и разработки (за исключением скважинной гидродобычи) можно рассматривать только одну скважину.

Общее представление о тех условиях, в которых приходится осуществлять вскрытие, и характеристику экономической эффективности системы вскрытия дает коэффициент вскрытия.

Различают несколько коэффициентов вскрытия: геологический, технологический и экономический.

Геологический коэффициент вскрытия – это отношение мощности покрывающих пород к мощности пласта. Определяется из выражения

$$K_2 = \frac{H}{m}, \quad (5.1)$$

где H – мощность покрывающих пород, м; m – мощность залежи, м.

Технологический коэффициент вскрытия (м/т) показывает, какая длина скважины приходится на тонну добываемых запасов. Определяется из выражения

$$K_T = \frac{l}{100PV\eta S}, \quad (5.2)$$

где l – длина добычной скважины, м; η – коэффициент извлечения полезного ископаемого в пределах отрабатываемого участка одной скважиной; P – производительность пласта полезного ископаемого, т/м², определяемая из выражения

$$P = m\gamma, \quad (5.3)$$

где γ – объемная масса полезного ископаемого, т/м³; V – площадь зоны действия скважины, м², определяемая из выражения

$$V = \pi R^2, \quad (5.4)$$

где R – радиус участка, разрабатываемого одной скважиной, м; S – среднее содержание полезного ископаемого, %.

Экономический коэффициент вскрытия определяется как отношение затрат на сооружение и оборудование добычной скважины и стоимости полезного ископаемого. Определяется из выражения

$$K_{\text{э}} = \frac{C}{A}, \quad (5.5)$$

где C – суммарные затраты по бурению, подготовке и оборудованию скважины, р.; A – стоимость запасов полезного ископаемого, извлекаемого из скважины, р.

Вскрытие месторождения является наиболее ответственным этапом при геотехнологии. Малейшие упущения в работах по бурению и подготовке скважины могут привести к ее потере или вызвать необходимость в производстве длительных и трудоемких ремонтных работ.

Вскрытие месторождения геотехнологическими скважинами состоит из ряда последовательно выполняемых операций: выбор места заложения; уточнение конструкции; бурение; обсадка и цементация; опрессовка; геологические, гидрогеологические и геофизические исследования; специальная подготовка; оборудование скважины для эксплуатации; оформление документации и сдача скважины в эксплуатацию.

Выбор места заложения скважин всегда связан с системой разработки, принятой на данном участке или месторождении. Отклонение от проектного места заложения скважины может нарушить работу соседних скважин и вызвать повышенные потери рабочего агента и полезного ископаемого в недрах.

Уточнение конструкции скважин связано с новыми геологоразведочными данными, полученными перед бурением скважины. При этом уточняется место расположения пакеров, фильтров, а также глубина опрессовки скважины.

Бурение геотехнологических скважин мало чем отличается от бурения нефтяных, газовых и других типов скважин. Особенность заключается в том, что при бурении геотехнологических скважин осуществляют отбор керна по продуктивной залежи и на несколько метров в бо-

ковых породах над и под ней, а бурение по продуктивной толще ведется с промывкой чистой водой.

Обсадка и цементация скважин иногда еще называется креплением. Таким образом, крепление скважин выполняется в два этапа: спуск обсадной колонны и цементация затрубного пространства. Обсадные трубы в процессе работы испытывают следующие виды нагрузок:

- наружное давление горных пород;
- внутреннее давление текущих по трубам флюидов;
- продольное растяжение и изгиб труб под действием собственного веса;
- напряжения, возникающие в результате температурного удлинения.

Наиболее предпочтительны в качестве обсадных сварные трубы, так как они обладают следующими преимуществами:

- уменьшается зазор между стенками скважины и наружным диаметром колонны за счет отсутствия муфт между трубами;
- увеличивается прочность и герметичность обсадной колонны;
- значительная экономия металла и цемента.

Цементация добычных скважин – важнейший процесс при подготовке их к эксплуатации, так как она обеспечивает герметичность и, следовательно, успешную их работу. Цементация защищает также колонну обсадных труб от воздействия агрессивных высокоминерализованных пластовых вод. Объемы цементации, марки используемого цемента, вид наполнителя, конструкция возводимой крепи зависят от конкретного геотехнологического способа разработки и типа месторождения полезного ископаемого. Обычно используют цементы марки 300 – 500. При геотехнологических способах, связанных с высокой температурой протекающих процессов, используют специальные термостойкие цементы. При цементации в глинистых и соляных породах цементный раствор приготавливают не на пресной воде, а на насыщенном водном растворе соли (360 кг на 1 м³). Промывку скважин перед цементацией и продавку цемента после окончания тампонажа также ведут насыщенным раствором поваренной соли. После окончания работ по цементации обсадной колонны скважину оставляют для затвердевания цемента на 16 – 24 часа. Этот период уменьшается, если в него добавляют ускорители схватывания, например жидкое стекло.

Опрессовка скважин представляет собой испытания их на герметичность. Обычно она производится в три приема:

1) испытание герметичности обсадной колонны, которое проводится после затвердевания цемента, но до разбуривания цементного башмака, под давлением, в 2–3 раза превышающим давление рабочего агента в процессе разработки;

2) испытание герметичности цементации, которое проводится после разбуривания цементного башмака в трубе и под обсадной колонной под давлением, соответствующим двойному давлению рабочего агента;

3) испытание герметичности скважины в целом, которое проводится после окончания проходки.

Испытания герметичности проводят водой, нагнетаемой в скважину поршневым насосом бурового станка, а при значительной приемистости скважины – центробежным насосом. При затрубных появлениях воды приступают к повторной цементации, так называемому «лечению» скважин.

Исследование скважин проводят после окончания бурения перед их оборудованиём. При этом производят опробование рудного пласта как по кернам, так и геофизическими методами. Кроме этого проводят гидрогеологические исследования с целью выявления дебита воды, времени восстановления уровня, качества воды и т. д.

Оборудование скважин зависит от конкретного геотехнологического способа и определяется проектом.

Оформление документации и сдача скважины в эксплуатацию является завершающей операцией вскрытия. Бурение скважин ведут в соответствии с утвержденным планом горных работ, где указаны порядок бурения и сдачи в эксплуатацию добычных и вспомогательных скважин. При бурении каждой добычной скважины составляют следующие документы:

- 1) буровой журнал и геологический паспорт скважины;
- 2) акт о заложении скважины с указанием точного ее местонахождения;
- 3) акт контрольного замера глубины скважины;
- 4) акт на скрытые работы, в котором указывают порядок бурения и разбуривания скважин;
- 5) акт об обсадке и цементации;
- 6) акт замера искривления скважин;
- 7) отчет о проведенных гидрогеологических исследованиях;
- 8) отчет о проведенных геофизических испытаниях;

9) акт на оборудование скважины с указанием точного расположения всех труб по отношению к почве пласта.

Во многом эффективность эксплуатации скважин зависит от полноты сведений, содержащихся в документации, так как это связано с выбором правильного решения при осложнениях и авариях, а также осуществление мероприятий по воздействию на пласт для повышения эффективности процесса.

Таблица 5.1

Классификация скважинных методов вскрытия

Способ вскрытия месторождения	Область применения
1. Отдельной скважиной: а) вертикальной б) наклонной, наклонно-горизонтальной	Скважинная гидродобыча (устойчивые покрывающие породы), подземное растворение солей (мощные залежи) Скважинная гидродобыча (неустойчивые покрывающие породы)
2. Группой скважин: а) спаренными б) взаимодействующими (вертикальными, наклонными и вертикальными)	Скважинная гидродобыча (небольшая глубина залегания), подземное растворение солей, добыча тепла Земли. Подземное выщелачивание металлов, выплавка серы, газификация угля (залежи небольшой мощности)
3. Горной выработкой и скважинами: а) скважинами из подземных выработок; б) скважинами с поверхности и из подземных выработок; в) подземными горными выработками	Отработка локальных рудных тел в сочетании с традиционной технологией добычи

Так как вскрытие является важным этапом геотехнологической отработки месторождений, постоянно ведутся работы по совершенствованию схем вскрытия в направлении:

- улучшения качества вскрытия продуктивных пластов за счет совершенствования техники и технологии бурения (повышение скорости бурения, механизация буровых работ, возможность обсадки скважины буровым станком и извлечения обсадной колонны);

- эффективного сооружения наклонно-горизонтальных скважин;
- подготовки месторождения к его эффективной разработке через скважины.

Выбор способа вскрытия зависит от:

- 1) технологической схемы разработки;
- 2) размеров месторождения в плане;
- 3) условий залегания залежи (мощности, угла падения, глубины залегания);
- 4) физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород;
- 5) рельефа поверхности.

Принципиальные схемы вскрытия месторождения отдельными скважинами приведены на рис. 5.1.

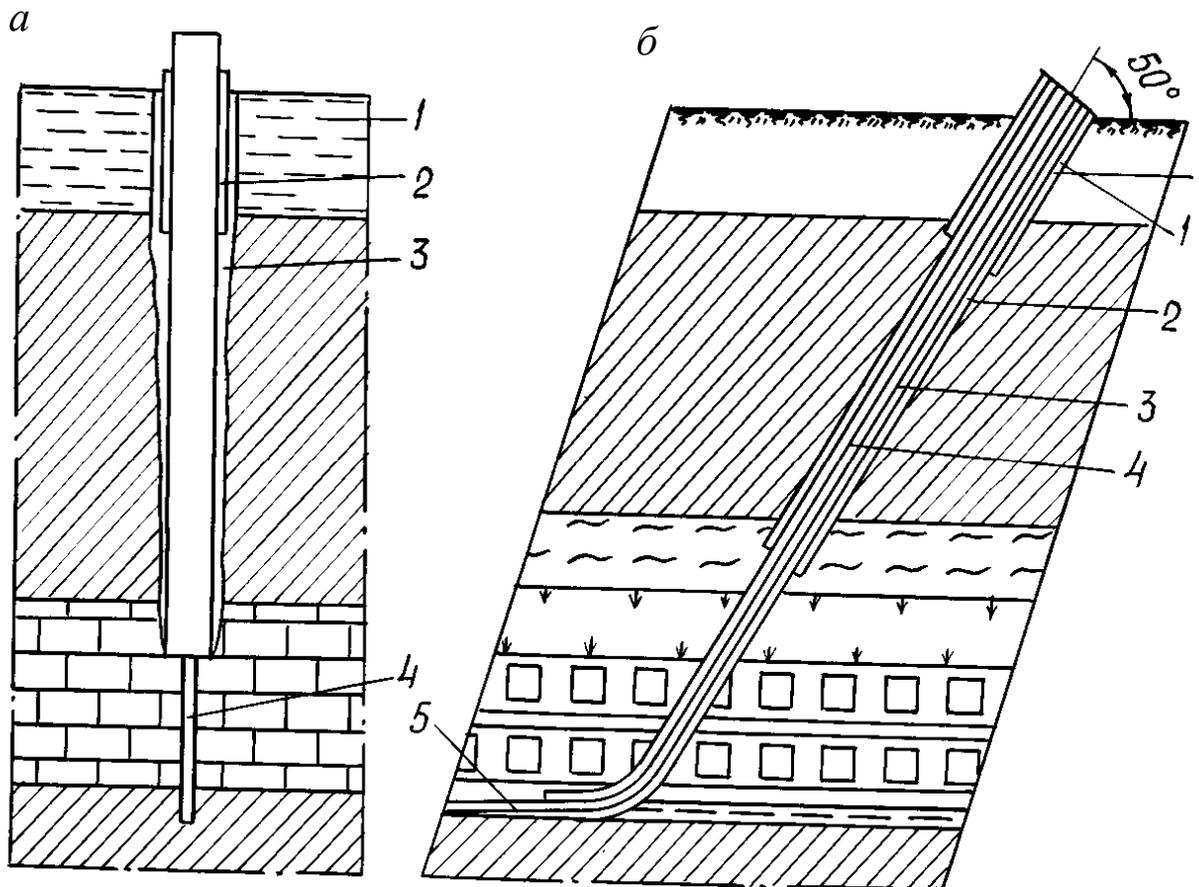


Рис. 5.1. Принципиальные схемы вскрытия месторождения отдельными скважинами

При вскрытии месторождений отдельной вертикальной скважиной (рис. 5.1,*а*) на устье оборудуют кондуктор 1. Колонну обсадных труб 2 опускают только до кровли отрабатываемой залежи. Затрубное пространство 3 заполняют цементным раствором. Участок скважины в продуктивной толще 4 обычно проводится без крепления.

При вскрытии месторождения отдельной наклонно-горизонтальной скважиной (рис. 5.1,*б*) в ее устье размещают направляющую колонну 1. До кровли залежи опускают промежуточную колонну 2. Обсадную колонну 3 опускают до почвы залежи или до окончания наклонной части скважины. В горизонтальной части скважины обычно располагают водоподводящую колонну 4. (Обычно этот способ вскрытия применяют при подземном растворении пластов каменной соли 5).

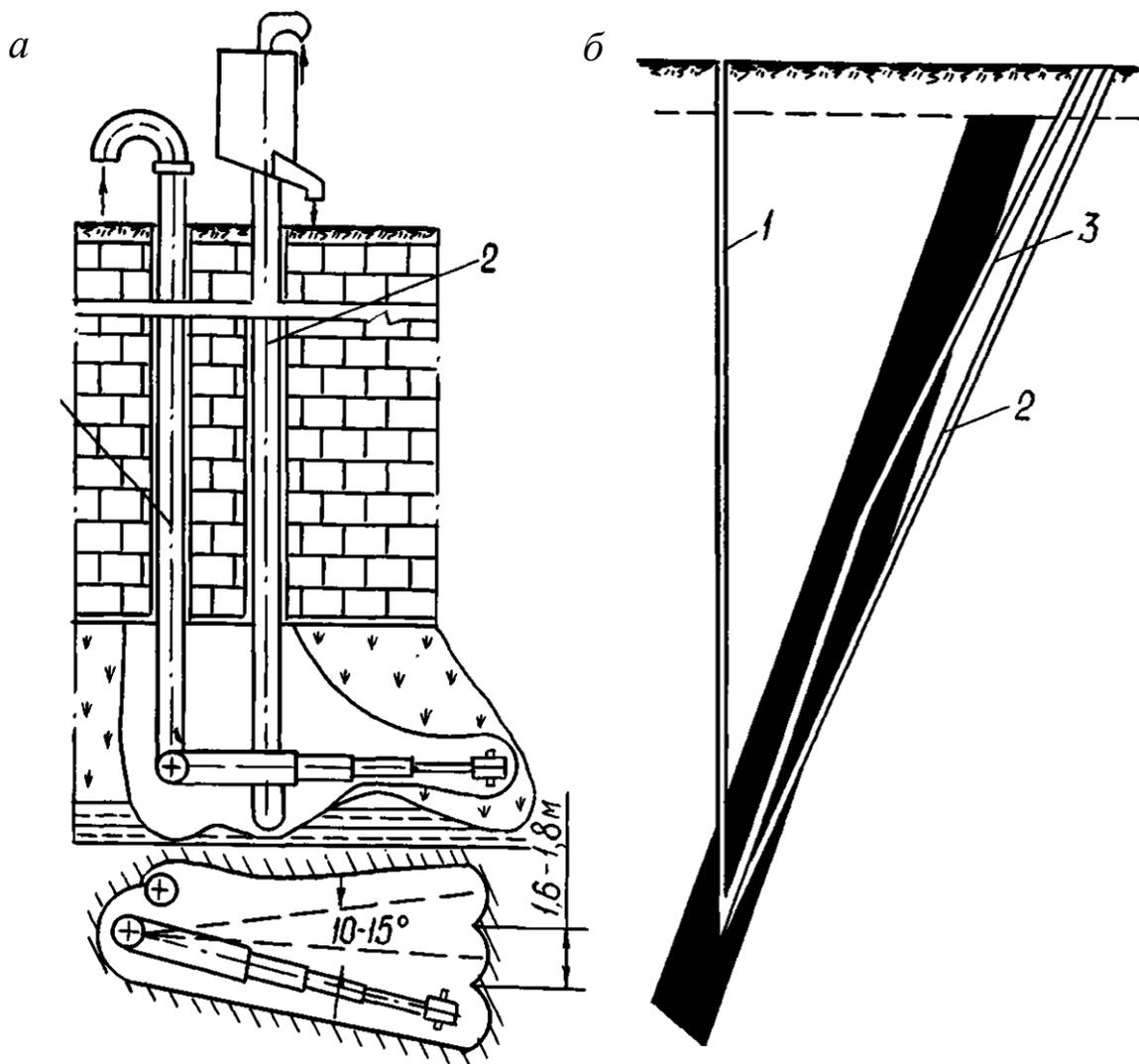


Рис. 5.2. Принципиальная схема вскрытия месторождения группой скважин: *а* – спаренными вертикальными скважинами; *б* – взаимодействующими наклонными и вертикальными скважинами

Принципиальная схема вскрытия месторождения группой скважин показана на рис. 5.2.

При вскрытии месторождений полезных ископаемых спаренными вертикальными скважинами (рис. 5.2, *а*), например при скважинной гидродобыче, одна скважина обычно является гидромониторной 1, а вторая – эрлифтной 2.

При вскрытии месторождений полезных ископаемых взаимодействующими наклонными и вертикальными скважинами (рис. 5.2, *б*), например при подземной газификации крутых угольных пластов, одна скважина является розжиговой 1, вторая – дутьевой 2, а третья – газоотводящей 3.

Схемы вскрытия горной выработкой и скважинами весьма разнообразны и зависят от конкретной схемы взаимного размещения горных выработок и залежи. Однако эти схемы не являются в полном смысле геотехнологическими, так как требуется наличие горных выработок, подземных или открытых.

5.2. Геотехнологические системы разработки месторождений

Под системой разработки месторождений полезных ископаемых геотехнологическими способами понимается порядок расположения, проходки и включения в работу добычных и вспомогательных скважин, увязанный в пространстве и времени.

Цель любого производственного процесса – получение максимального эффекта при минимальных затратах. Дополнительными технологическими и экономическими требованиями, предъявляемыми к геотехнологическим системам разработки, являются:

- обеспечение заданного уровня извлечения;
- обеспечение заданного уровня добычи;
- достижение минимальной себестоимости;
- обеспечение экологической чистоты.

В первую очередь система разработки определяется сеткой расположения скважин, которая зависит от горно-геологических условий и от способа отделения полезного ископаемого, способа управления горным давлением.

Для каждого способа геотехнологической отработки месторождений полезных ископаемых характерны определенные варианты размещения скважин и технологии добычи.

Классификация геотехнологических систем разработки

Индекс системы	Название системы разработки	Технологическая схема
I	Скважинами–камерами	Отдельными скважинами
		Сдвоенными скважинами
II	Взаимодействующими скважинами	Рядами
		Ячейками
		Орошение отработанных блоков

Наиболее характерно понятие системы разработки при скважинной гидродобыче, так как при этом способе очень четко выражается понятие очистного забоя. Форма очистного забоя, последовательность и направление очистной выемки, кроме параметров, характеризующих элементы залегания месторождения, во многом определяются используемым оборудованием и приемами ведения технологического процесса. При способе скважинной гидродобычи в очистном забое выполняются практически все основные производственные процессы, осуществляемые и в очистном забое шахты или рудника: отбойка, доставка и управление кровлей. Как видно, отсутствует только процесс крепления кровли, но при большинстве рудных систем разработки он также отсутствует.

При скважинной гидродобыче важным элементом технологии является технологическая схема выемки руды в камере, отличающаяся по направлению действия гидромониторной струи и схеме доставки разрушенной руды к всасу выдачного устройства. Различают следующие технологические схемы выемки руды в камере при скважинной гидродобыче: встречным, попутным, совмещенным забоями и комбинированный способ выемки.

При схеме выемки встречным забоем направление разрушающей струи гидромонитора не совпадает с направлением смывающей струи.

При схеме выемки попутным забоем направление разрушающей струи гидромонитора совпадает полностью или частично с направлением смывающей струи.

При схеме выемки совмещенным забоем струи боковых насадок гидромонитора попутным забоем разрушают пласт руды и смывают ее к всасу пульпоподъемного механизма, а струи передних насадок встречным забоем разрабатывают пласт.

При комбинированном способе выемки две рядом расположенные камеры отрабатываются по схеме встречным или совмещенным забоями, а отработка междукammerного целика и смыв отбитой руды с почвы камеры ведутся по схеме попутного забоя.

В любом случае, при углах падения залежи менее 5° необходимо организовать принудительную доставку разрушенной руды к всасу пульпо-подъемного механизма либо созданием искусственного уклона в почве камеры, что сопровождается разубоживанием руды, либо гидромониторной струей. При углах падения залежи более 5° доставка разрушенной руды осуществляется самотеком.

В зависимости от стадийности отработки залежи в камере различают следующие технологические схемы: сплошным, почвоуступным и потолкоуступным забоями.

При отработке залежи сплошным забоем пласт отрабатывают на всю мощность за один прием. При этом возможны два варианта:

- 1) пласт отрабатывается гидромониторной струей на всю мощность;
- 2) пласт подрезается гидромониторной струей у почвы, а выше-расположенная толща обрушается под воздействием горного давления.

При отработке залежи почвоуступным забоем пласт разрабатывают слоями сверху вниз.

При отработке залежи потолкоуступным забоем пласт разрабатывают слоями снизу вверх.

Форма отработанного пространства обычно бывает круглой при одиночных добычных скважинах, а при взаимодействующих – любой, что определяется расположением добычных скважин друг относительно друга, контурами залежи, формой, размещением и размерами целиков.

Существует несколько классификаций геотехнологических систем разработки, но наиболее удачной, на наш взгляд, является классификация по способу управления горным давлением. По этому признаку различают:

- системы с открытым очистным пространством;
- системы с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород;
- системы с закладкой выработанного пространства.

Наиболее распространенные варианты систем разработки скважинной гидродобычи с открытым очистным пространством приведены на рис. 5.3.

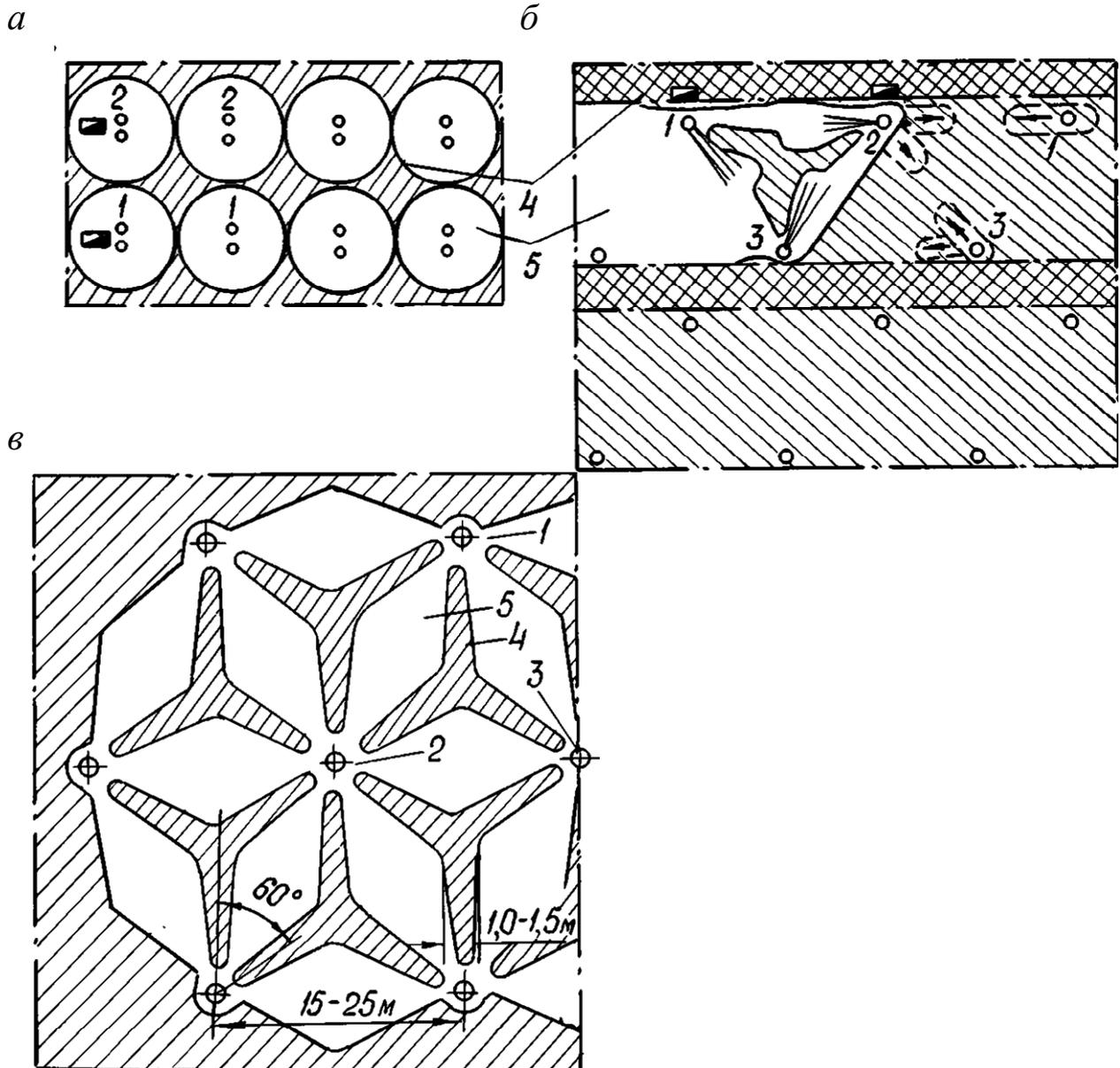


Рис. 5.3. Варианты систем разработки скважинной гидродобычи с открытым очистным пространством: *а* – камерная система с целиками; *б* – блоковая система с ленточными целиками; *в* – камерная система с звездообразными целиками

При системе с камерами круглой формы и целиками (см. рис. 5.3, *а*) каждая камера вскрывается двумя добычными скважинами 1 и 2, расположенными в центре добычной камеры 5 круглой формы. Одна из

скважин является гидромониторной, а вторая – эрлифтной. Между камерами оставляются целики 4, сложной формы в плане.

При блоковой системе с ленточными целиками (см. рис. 5.3, б) добычные скважины 1, 2, 3 располагаются в два ряда. Отработка залежи ведется блоками. При отработке двух рядов добычных скважин образуется вытянутая по простиранию добычная камера-блок 5. Одновременно отрабатываются три скважины, при этом разрушается участок залежи треугольной формы. Между камерами оставляется ленточный целик 4. Расстояние между ленточными целиками определяется устойчивостью пролетов камер.

При камерной системе с звездообразными целиками (см. рис. 5.3, в) добычные скважины 1, 2, 3 располагаются в вершинах равностороннего треугольника. Отработка залежи ведется гексагональными камерами-блоками 5. На границах и в центре блоков располагаются целики 4, имеющие сложную звездообразную трехлучевую форму. Угол между лучами двух соседних целиков составляет 60° . Ширина лучей-целиков составляет 1,0–1,5 м. Расстояние между добычными скважинами зависит от многих факторов и колеблется от 15 до 25 м.

Обычно системы с открытым очистным пространством применяют при устойчивых покрывающих породах.

При мощности залежи 2–3 м выемку руды осуществляют сплошным забоем, при большей – слоями. При этом слои оформляют таким образом, чтобы уклон почвы в них был достаточным для самотечной доставки разрушенной руды.

Коэффициент извлечения руды при системах с открытым очистным пространством зависит от горно-геологических и горнотехнических факторов и колеблется в пределах 50–70 %.

Достоинством систем с открытым очистным пространством является то, что добычные агрегаты располагают над целиками, а добыча осуществляется в основном попутным забоем.

Наиболее распространенные варианты систем разработки скважинной гидродобычи с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород приведены на рис. 5.4.

При системе с отдельными агрегатами (см. рис. 5.4, а) отработку ведут полосами по падению. В одновременной работе могут находиться одна или несколько полос. Добычные скважины 1, 2, 3 бурят по центру полосы. Отработку участка 5 ведут заходками I–VI от границ полосы к центру. После выемки заходок происходит обрушение или плавное

опускание вмещающих пород 4. Выемку руды в одновременно обрабатываемых полосах ведут обычно с опережением на одну скважину.

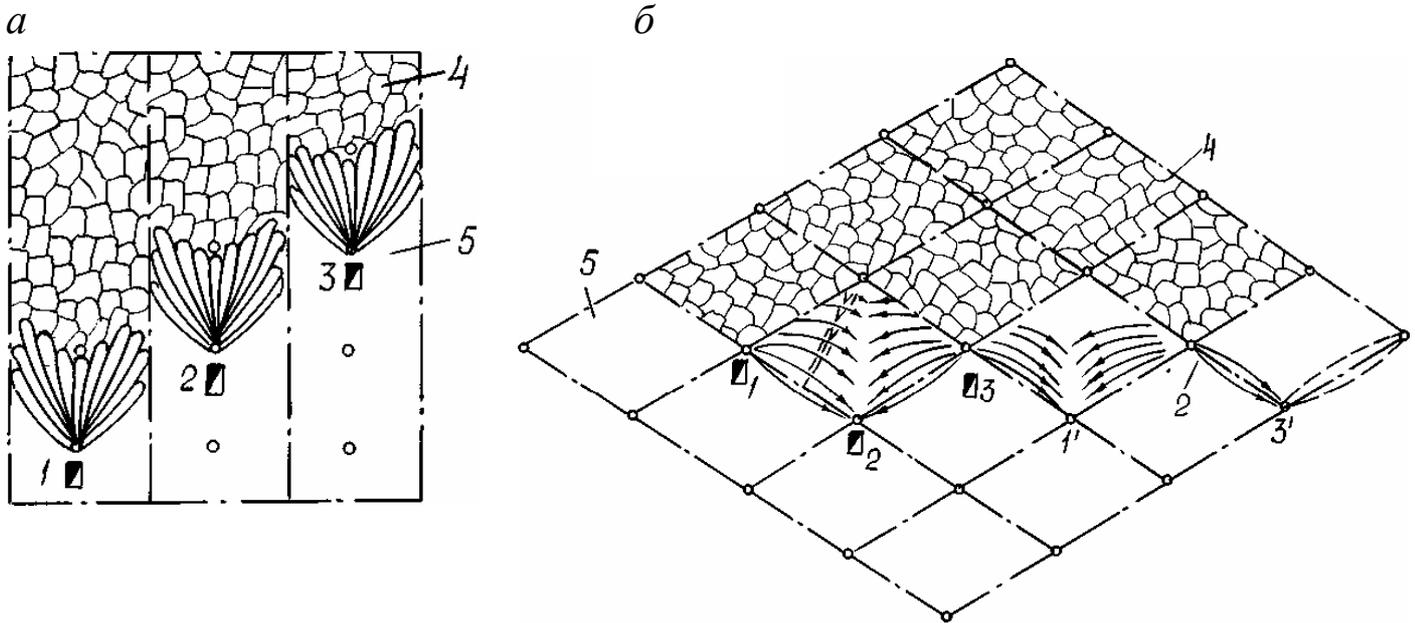


Рис. 5.4. Варианты разработки скважинной гидродобычи с обрушением или плавной посадкой вмещающих пород: *а* – отдельными агрегатами; *б* – взаимодействующими агрегатами

При системе с взаимодействующими агрегатами обрабатываемый участок залежи разбивают на ромбы, в вершинах которых бурят добычные скважины 1, 2, 3, 1', 2', 3'.

Отработку участков-ромбов 5 ведут последовательно или одновременно. Скважины, пробуренные в боковых вершинах ромбов 1, 3, являются гидромониторными, а в нижней – 2, 1', 3' – эрлифтными. Отработку участков-ромбов ведут по падению. При этом назначение скважин (гидромониторных и эрлифтных) может меняться. Отработку участка ведут заходками I–VI начиная снизу вверх. После отработки последней заходки VI происходит обрушение или плавное опускание вмещающих пород 4.

Системы разработки с обрушением или плавным опусканием вмещающих пород обычно применяют для выемки пластов, залегающих под неустойчивыми или пластичными породами. При необходимости возможно применение способов принудительного обрушения кровли гидроразрывом, взрывным торпедированием и т. п. Для уменьшения скорости обрушения кровли возможно оставление временных или податливых подзавальных целиков.

Сетка расположения скважин при системах разработки с обрушением и плавным опусканием зависит от числа взаимодействующих агрегатов, скорости подвигания очистного забоя и т. п.

При системах с обрушением и плавным опусканием вмещающих пород возможно вскрытие наклонными скважинами, расположенными за пределами зоны сдвигающих пород. Это позволяет существенно увеличить объем добычи из одной скважины и обеспечить полную безопасность ведения горных работ.

Системы разработки скважинной гидродобычи с закладкой выработанного пространства обычно применяют при добыче особо ценных руд, когда не допускается оставление целиков или когда необходимо исключить или значительно уменьшить оседание земной поверхности. Один из возможных вариантов системы разработки с закладкой выработанного пространства приведен на рис. 5.4. Область применения этих систем может увеличиться, если вместо закладочного материала применять соответствующим образом подготовленные бытовые и вредные промышленные отходы.

Отработку залежи можно вести на всю мощность или слоями, но закладку следует возводить одновременно на всю мощность залежи снизу вверх. После окончания отработки и заполнения камер закладочным материалом приступают к погашению межкамерных целиков с использованием или без закладки.

При технологии подземного выщелачивания выделяют три группы систем разработки, отличающиеся схемой расположения скважин:

- площадные (ячеистые) системы;
- линейные системы;
- комбинированные системы.

Площадные (ячеистые) системы расположения скважин характерны наличием отдельных ячеек по всей площади залежи, при этом на каждую ячейку бурят одну откачную и несколько закачных скважин.

Линейные системы расположения скважин отличаются чередованием рядов откачных и закачных скважин.

Комбинированные системы расположения скважин включают элементы площадных и линейных систем. К комбинированным системам относят также системы с использованием вертикальных и горизонтальных противофильтрационных завес, предотвращающих некоторые негативные особенности применяемых систем разработки, рассмотренные в главе 6.

5.3. Основы выбора геотехнологических систем разработки

Выбрать систему разработки – значит определить направление отработки залежи в целом и установить сетку размещения скважин. Основными элементами системы разработки являются: направление отработки, сетка скважин, порядок ввода скважин в эксплуатацию во времени и пространстве.

При выборе элементов системы разработки необходимо учитывать влияние следующих факторов:

- глубины залегания залежи;
- технологичности процесса добычи;
- извлекаемости полезного ископаемого;
- производительности пласта;
- условий залегания;
- неоднородности пласта;
- рельефа почвы залежи.

Математически проблема выбора более рациональной системы разработки сводится к максимизации целевой функции при наличии начальных и конечных условий. Максимизируемой функцией обычно служит прибыль. Суммарная прибыль (Π) за весь срок эксплуатации месторождения определяется из выражения

$$\Pi = \sum_{i=1}^T (C_i - C_i) B_i \eta_i, \quad (5.6)$$

где T – число периодов при отработке месторождения; C_i – цена продукции в i -й период эксплуатации месторождения, р./т; C_i – себестоимость продукции в i -й период эксплуатации месторождения, р./т; B_i – балансовые запасы, обрабатываемые в i -й период эксплуатации месторождения, т; η_i – коэффициент извлечения запасов, обрабатываемых в i -й период эксплуатации месторождения.

Различные значения цены в определенные периоды эксплуатации месторождения определяются изменением качества получаемой продукции в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий.

Расчет величин, входящих в формулу (5.6), представляет наиболее сложную задачу, требующую для каждого конкретного случая разработки детальной расчетной схемы и методики расчета.

5.4. Оценка эксплуатационных потерь полезного ископаемого при геотехнологии

Степень извлечения запасов зависит от системы разработки. Технически возможно извлекать 100 % запасов, но это не всегда экономически оправдано.

Как правило, геотехнологические способы отличаются небольшой степенью извлечения, однако возможна повторная отработка месторождения.

Обычно пользуются текущим, конечным и максимальным коэффициентами извлечения. Соответственно текущий – в момент добычи; конечный – к моменту завершения добычи; максимальный – предельно возможный.

Оценка вариантов разработки с учетом потерь полезного ископаемого проводится на основе учета ценности разрабатываемого месторождения. Следовательно, при выборе варианта технологической схемы добычи необходимо соизмерять размеры экономического выигрыша и экономического ущерба, связанные со структурой и величиной потерь полезного ископаемого.

Общий коэффициент извлечения удобно дифференцировать на две величины:

$$\eta = \eta_T \eta_p, \quad (5.7)$$

где η_T – технологический коэффициент извлечения (коэффициент извлечения отбитого полезного ископаемого), который определяется из соотношения

$$\eta_T = \frac{G_\xi}{G_\Delta}, \quad (5.8)$$

где G_ξ – количество извлеченного полезного ископаемого, т; G_Δ – количество полезного ископаемого в контурах, разрушаемых при добыче, т; η_p – коэффициент извлечения, определяющий потери, связанные с системой разработки месторождения:

$$\eta_p = \frac{V_p}{V_{II}}, \quad (5.9)$$

где V_p – объем запасов полезного ископаемого в контурах, разрушаемых при добыче (не учитывается объем целиков), м^3 ; V_{II} – общий объем залежи, запроектированной к отработке (учитывается объем целиков), м^3 .

В основном извлечение полезного ископаемого зависит от расстояния между скважинами. Установлено, что при увеличении расстояния между скважинами коэффициент извлечения уменьшается нелинейно, асимптотически приближаясь к определенному значению. С изменением расстояния между скважинами запасы, приходящиеся на одну скважину, изменяются по параболе, а извлекаемые запасы – по гиперболу.

Очевидно, что для каждого месторождения и даже его участков должна быть выбрана оптимальная сетка скважин, обеспечивающая наиболее эффективную разработку месторождения, учитывающая как извлечение полезного компонента, так и экономическую и технологическую стороны разработки.

Контрольные вопросы

1. *Дайте определение вскрытию месторождения при геотехнологических способах разработки.*
2. *Назовите основные вскрывающие выработки при геотехнологии и охарактеризуйте их назначение.*
3. *Поясните сущность геологического, технологического и экономического коэффициентов вскрытия.*
4. *Назовите последовательность операций при решении вопроса вскрытия месторождения геотехнологическими скважинами.*
5. *Поясните классификацию скважинных методов вскрытия.*
6. *Покажите на рисунках принципиальные схемы вскрытия месторождения отдельными скважинами и группой скважин.*
7. *Дайте определение термину система разработки при геотехнологии.*
8. *Какие требования предъявляются к системам разработки при геотехнологических способах добычи полезных ископаемых?*
9. *Поясните классификацию геотехнологических систем разработки по способу управления горным давлением.*

10. Покажите на рисунках варианты систем разработки скважинной гидродобычи с открытым очистным пространством.

11. Поясните варианты систем разработки скважинной гидродобычи.

12. Поясните методику выбора геотехнологических систем разработки.

13. Какие требования предъявляют к ведению документации при сооружении скважины и её эксплуатации?

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

6.1. Подземное растворение полезных ископаемых

Подземное растворение солей является наиболее древним из геотехнологических способов разработки месторождений полезных ископаемых. Еще в Древнем Китае в первом тысячелетии до нашей эры для добычи соляных растворов осуществлялось бурение скважин глубиной до 900 м диаметром 12–15 см. В XVII веке в России действовало 435 буровых скважин глубиной до 270 м для подъема естественных рассолов.

Подземное растворение – способ добычи полезных ископаемых через скважины путем перевода в водный раствор одного или нескольких компонентов в недрах. Одновременно с добычей при подземном растворении осуществляются обогащение, очистка (для поваренной соли) и избирательное извлечение (для калийных солей).

В конце XIX – начале XX веков разработаны и освоены способы растворения каменной соли в подземных выработках и через буровые скважины с поверхности. Первый промысел в России по разработке соляных залежей через скважины построен в 1910 году на Новокарфагенском месторождении в Донецкой области Украины.

В настоящее время подземному растворению подвергают каменную и калийную соли, а также бишофит и боросолевые руды. Следующие соли являются перспективными для подземного растворения: галит (NaCl), сильвин (KCl), лангбейнит ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$), каинит ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), кизерит ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), бишофит ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

В Канаде (Саскачеван) с 1964 года действует первое предприятие по добыче калийной соли методом подземного растворения.

Сущность способа подземного растворения заключается в следующем. Толщу пород пересекают скважиной, которую обсаживают колонной труб. По водоподающей колонне в скважину поступает пресная вода, которая растворяет соль. Под давлением растворяющей жидкости образовавшийся рассол поднимают на поверхность по рассолоподъемной колонне труб.

Горнодобывающие предприятия, осуществляющие добычу соли способом подземного растворения, называют рассолопромыслами. В состав рассолопромысла входит комплекс наземных и подземных производственных объектов, обеспечивающих непрерывную добычу и подачу рассола потребителю.

Отработку залежи ведут камерами через добычные скважины. Подачу воды в камеры и откачку рассола осуществляют насосной станцией с контрольно-распределительным пунктом. Подачу электроэнергии потребителям осуществляют линией электропередачи через трансформаторную подстанцию. На поверхности рассолопромысла располагают завод-потребитель, административное здание, хранилище слабых рассолов, резервуар воды и рассола, насосная станция нерастворителя, резервуары нерастворителя.

Основными технологическими сооружениями рассолопромысла являются добычные скважины подземного растворения. Конструкция скважины определяется исходя из особенностей геологического строения залежи, гидрогеологических условий, физико-механических характеристик пород и других условий.

Скважины подземного растворения оборудуются направляющим устройством, кондуктором, промежуточными обсадными, эксплуатационными и технологическими свободновисящими колоннами. Диаметр эксплуатационной колонны составляет до 325 мм, а диаметр технологической водоподающей – до 219 мм, рассолоподъемной – до 146 мм.

На устье скважины монтируют специальный оголовок, обеспечивающий герметизацию устья, герметичное разобшение технологических колонн и возможность их подъема и спуска.

Схемы вскрытия при подземном растворении могут быть с вертикальными, наклонными и наклонно-горизонтальными скважинами. Рассол обычно поднимают по вертикальной скважине. При использовании наклонных скважин извлечение может превышать 50 %.

Системы разработки могут быть с индивидуальными и взаимодействующими скважинами.

При подземном растворении солей возможны следующие способы управления процессом: прямоточные, противоточные, гидроврубные, послойного растворения.

Преимущественно используется способ, основанный на работе скважин по принципу «выдавливания рассола», когда нагнетается пресная вода, а рассол поднимается под воздействием давления.

Различают схемы неуправляемого и управляемого подземного растворения. При неуправляемом подземном растворении применяют противоточный способ, когда нагнетание растворителя осуществляется по затрубному пространству, а выдавливание образующегося рассола – через центральную колонну. При управляемом подземном растворении применяют прямоточный способ, когда изменяется схема подачи агентов.

Уже к 80–м годам XX века способы прямоточного управления процессом прекратили применять из-за низких технико-экономических показателей: извлечение запасов – до 5 %, производительность скважины – до 7–10 м³/ч, непродолжительный срок эксплуатации скважин – до 5–7 лет.

К управляемым схемам подземного растворения относят гидроврубные и послойного растворения.

Способ гидровруба был предложен в 1933 году американским ученым Э. Трэпом, а с 1936 года этот метод начали применять в США. Способ был усовершенствован и внедрен в отечественную практику с 1947 года на Славянском месторождении П.А. Кулле, который использовал в качестве нерастворителя нефть и ее производные или воздух.

Гидровруб – это горная выработка, создаваемая искусственным путем в нижней части соляного пласта и имеющая форму горизонтального кольца. Идея гидровруба была выдвинута Ф. Жанро в 1907 году, который обосновал возможность оседания нерастворимых и не препятствующих процессу растворения частиц на заранее подготовленное дно камеры.

Способ гидровруба применяют на Райгородском рассолопромысле в Башкирии и ряде рассолопромыслов в США, расположенных в штатах Мичиган и Техас.

Сущность способа заключается в следующем. В скважину опускают три трубы. Нерастворитель подают в пространство между третьей

и второй от стенки скважины трубами, растворитель – между первой и второй, рассол поднимается по центральной трубе. После образования вруба нерастворитель убирают и начинают процесс интенсивной отработки соляной залежи снизу вверх.

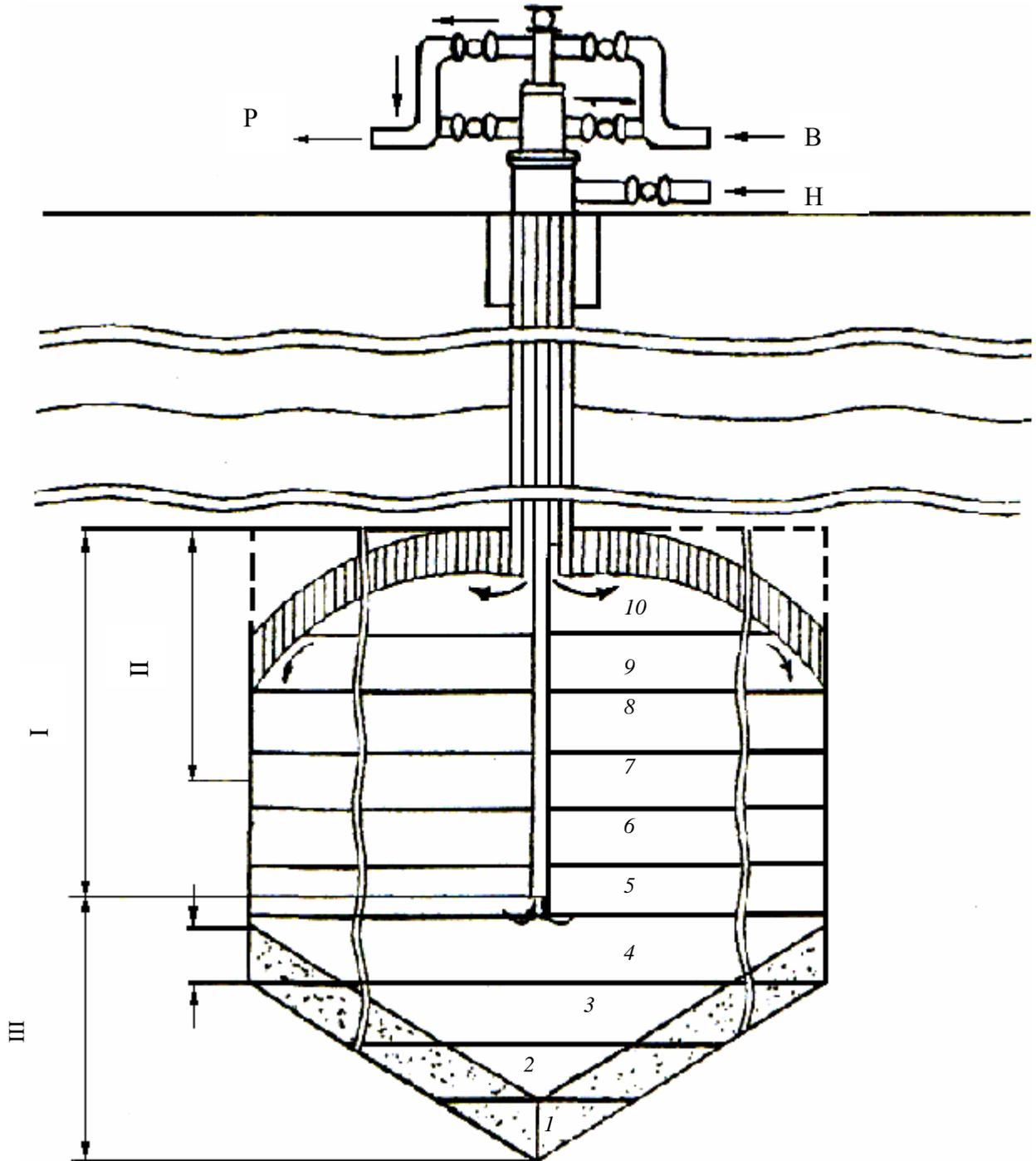


Рис. 6.1. Принципиальная схема послойной выемки камер при подземном растворении солей: В – вода; Р – раствор; Н – нерастворитель; I – активная зона; II – зона формирования рассола; III – зона консервации; IV – зона закладки; 1 – 10 – слои (ступени)

Ряд недостатков, присущих способу гидровруба, был устранен в способе послойного (ступенчатого) растворения. Принципиальная схема послойной выемки камер при подземном растворении солей приведена на рис. 6.1. Сущность способа заключается в отработке соляной залежи снизу вверх отдельными горизонтальными слоями (ступенями). Высота слоя составляет 5–15 м, а диаметр – 100 м.

Сущность способа заключается в том, что после образования гидровруба на первой ступени водоподающую колонну труб поднимают до отметки верхней границы второй ступени, а рассолоподъемную – на высоту, обеспечивающую возможность получения чистых рассолов. При этом систематически подают жидкий нерастворитель.

Кровлю каждого слоя изолируют слоем нерастворителя и за его уровнем ведут систематический контроль. Это позволяет извлекать из каждого слоя заранее заданное расчетное количество соли и управлять процессом формообразования камер.

В камере выделяют четыре зоны: активную, формирования рассола, консервации, закладки.

Активная зона (I) охватывает верхние 2/3 камеры, в ней происходит интенсивное движение жидкости. Зона формирования рассола (II), в которой растворитель насыщается солью, находится в верхней половине камеры и является частью активной зоны. Зона консервации (III) охватывает нижнюю 1/3 камеры и включает зону закладки (IV), расположенную в самой нижней части камеры.

Способ послойной выемки получил наибольшее распространение и в настоящее время является основным при эксплуатации рассолодобычных скважин. При этом способе извлечение составляет более 20 %, производительность скважины достигает 70–100 м³/ч и появляется возможность отрабатывать залежи соли с содержанием до 30 % нерастворимых включений и управлять процессом формирования камер. Глубина разработки колеблется от 200–300 до 1800 м.

Метод послойной выемки применяют в странах СНГ (Усольско-Сибирский, Яр-Бишкадакский, Приереванский рассолопромыслы), в Болгарии (Мировское месторождение), в Румынии (месторождения Окта-Мурем, Окнеле-Марь, Тыриу-Окиа), в США. Недостатком способа является получение растворов слабой концентрации в период размыва вруба.

Отработку камер подземного растворения осуществляют в два этапа: подготовительный и эксплуатационный.

На подготовительном этапе создается начальная поверхность растворения соли путем размыва горизонтальной полости небольшой высоты – гидровруба, обеспечивающей получение промышленной производительности камеры по кондиционному рассолу. Продолжительность этого периода составляет 360–540 суток. Размыв полости производят ступенями. Число ступеней и высоту каждой из них определяют горно-геологические условия месторождения, качественные характеристики соли и заданное время размыва.

При зашламовании нижней части рассолозаборной колонны применяют реверсивный режим работы скважины: прямоток меняют на противоток и наоборот.

На эксплуатационном этапе осуществляют добычу полезного ископаемого. Её начинают после образования камеры заданной емкости и формы и выхода рассола концентрацией 305 г/л. При этом прекращают подачу воды, выпускают нерастворитель и приподнимают технологические колонны. Башмаки устанавливают на уровне кровли очередного слоя, а положение рассолоподъемной колонны определяют высотой зоны закладки камеры нерастворимыми включениями. После этого скважину вновь заполняют нерастворителем и процесс возобновляют.

Высоту эксплуатационной ступени (м) определяют по формуле

$$h_{cm} = \frac{V}{\pi R^2}, \quad (6.1)$$

где V – объем соли в слое, м³; R – радиус камеры, м; обычно $R = 100–120$ м.

Производительность скважины (м³/ч) определяют из выражения:

$$q = 1,4V_k + 4S, \quad (6.2)$$

где V_k – объем камеры, м³.

Время отработки слоя (сут) определяют по формуле

$$T = \frac{R}{\omega}, \quad (6.3)$$

где ω – скорость растворения боковых стенок камеры, м/сут; принимается $\omega = 0,01–0,22$ м/сут.

В подготовительный период образуется большое количество слабых растворов с концентрацией до 200 г/л. Для их утилизации или захоронения используют глубокие подземные водоносные горизонты, а также применяют их для законтурного заводнения при разработке нефтяных залежей с поддержанием пластового давления.

В зависимости от порядка отработки соляных месторождений и способа управления горным давлением различают системы камерного, батарейного и сплошного растворения.

При системе камерного растворения отработку залежи ведут камерами через индивидуальные или взаимодействующие скважины, между которыми оставляют целики, исключающие возможные деформации поверхности.

При камерной разработке залежи индивидуальными скважинами возможны три варианта размещения камер: в пределах всей разрабатываемой толщи, с соосным размещением в пределах каждой пачки залежи, с несоосным размещением по мощности залежи.

При разработке пластов простого строения используют систему с размещением камер в пределах всей разрабатываемой толщи полезного ископаемого.

При разработке пластов сложного строения или сближенных пластов используют камерно-этажную систему с соосным размещением камер в пределах мощности каждой пачки или кондиционного пласта.

При разработке мощных соляных залежей, куполов и месторождений сложной формы залегания используют камерно-этажную систему с несоосным размещением камер по мощности.

При камерной разработке залежи взаимодействующими скважинами отработку ведут сдвоенными скважинами. При этой системе на подготовительном этапе скважины размываются индивидуально, а на эксплуатационном, после сбойки взаимодействующих скважин, размывом или гидроразрывом совместно. При этом скважины используются поочередно: то как водоподающая, то как рассолозаборная. Этот способ с 60-х годов применяется на Яр-Бишкадакском рассолопромысле, однако не нашел широкого распространения из-за сложности поддержания уровня нерастворителя на заданной глубине.

К батарейной системе относят схему поэтапной отработки камер через взаимодействующие скважины. Вначале отработку камер ведут через индивидуальные скважины, а затем, после сбойки, новые камеры подключают к объемам действующих камер. Камеру первого этапа с

помощью канала-сбойки соединяют с камерой, обрабатываемой у подключенной скважины. Воду подают в скважину второго этапа, а раствор отбирают из скважины первого этапа. Нерастворитель подают в обе скважины одновременно.

Этот способ активно внедряется в промышленность, т. к. позволяет обрабатывать запасы, оставляемые в междукамерных целиках через группы взаимодействующих скважин, благодаря чему повышается извлечение полезного ископаемого. Между камерами, образуемыми группами скважин, оставляют целики для предотвращения сдвижения поверхности.

При системе сплошного растворения участок месторождения вскрывают группой скважин, которые соединяются между собой у подошвы залежи гидроразрывом или гидроврубом для образования единого искусственного рассольного горизонта. Отработку залежи ведут подачей воды в водоприемные скважины, расположенные со стороны восстания пласта, и последующим отбором рассола из рассолозаборных скважин, расположенных со стороны падения.

При отработке свиты пластов или пластов сложного строения подачу воды осуществляют первоначально в нижний пласт или пачку.

Вовлечение в отработку верхних пластов происходит при естественном обрушении пропластков несолевых пород, разделяющих продуктивные пласты. Если это обрушение не происходит, проводят перфорацию обсадных колонн водоприемных скважин.

Обычно сплошную систему применяют при отработке маломощных залежей, так как при этом происходит деформация (просадка) земной поверхности. По этой причине этот способ имеет ограниченное распространение и используется только на Новокарфагенском рассолопромысле.

Для интенсификации процесса растворения используют горнотехнические и физико-химические методы. К горнотехническим методам относят: принудительное обрушение слоев, рыхление полезного ископаемого в массиве, гидравлический разрыв пласта. К физико-химическим методам относят: добавку реагентов, использование новых видов рабочих агентов, воздействие физических полей, использование поверхностно и химически активных веществ.

Контроль за уровнем нерастворителя в камере при подземном растворении осуществляется регулярно одним из известных методов: манометрическим, подбашмачным, радиоактивным и др.

Параметры подземных камер определяют расчетным путем и ежегодными гидролокационными съемками. Камеры подземного растворения отличаются высокой устойчивостью, поэтому их используют для подземного хранения нефтепродуктов и сжиженных газов, а также захоронения токсичных отходов производства.

Способ подземного растворения солей получил широкое распространение в мировой горнодобывающей промышленности. Основная часть добычи каменной соли для содовой, хлорной, пищевой и других отраслей промышленности обеспечивается именно этим способом, благодаря относительной простоте организации добычи и высоким экономическим показателям. Так, производительность труда при подземном растворении в 4 раза выше, а удельные капитальные затраты в 7 раз ниже, чем при шахтном способе добычи.

В настоящее время подземным растворением добывают около 30 млн т каменной соли в Болгарии, Румынии, Польше, Австрии, Великобритании.

Особенно эффективны рассолопромыслы как сырьевые базы содовых и химических производств. По рентабельности они предпочтительнее, чем цехи по растворению привозной соли, добытой не только подземным способом, но и открытым способом в солевых озерах. Важнейшими факторами, которые влияют на технико-экономические показатели рассолодобычи, являются следующие: горнотехнические условия; источник водоснабжения; мощность предприятия; расстояние транспортировки; численность персонала; качество рассолов.

Для условий Яр-Бишкадакского месторождения характерны следующие показатели:

- мощность пластов – 450 м;
- глубина скважин – 1180 м;
- мощность промысла – 16000 тыс. м³ /год;
- число скважин – 48;
- расстояние транспортирования – 25 км;
- численность трудящихся – 260;
- себестоимость рассола (в ценах до 01.01.91) – 0,117 р./м³.

Метод подземного растворения применяют для разработки месторождений бишофита с целью получения хлормagneиевых рассолов, которые применяют для приготовления буровых растворов, образования пленки на сыпучих материалах с целью предотвращения их распыления, ускорения твердения бетона, затвердения магнезиального цемента,

тушения лесных пожаров с воздуха, пропитки древесины, использования в качестве минеральной подкормки для скота, в медицине для лечения хронических заболеваний опорно-двигательного аппарата.

С 1976 году на Светлоярском участке Волгоградского месторождения бишофита ведут работы по добыче рассола с глубины 1761 м. Мощность пласта составляет 52 м и включает 96 % бишофита ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Рассол получают прямой и обратной промывкой пресной водой через скважину диаметром 114 мм с торпедированием массива. Концентрация получаемого хлормагнезиевого рассола составляет 430 г/л. Вместе с бишофитом в раствор переходят все примеси в виде макро- и микроэлементов ($MgBr$, $CaSO_4$, $NaCl$, KCl , $MgSO_4$). В качестве растворителя бишофита могут использоваться насыщенные хлорнатриевые рассолы и стоки от действующих производств.

Подземное растворение можно использовать при разработке борсолевых руд. Основным потребителем бора является атомная промышленность, так как он является хорошим поглотителем протонов. Обычно борсолевые руды находятся в растворимом водой галитовом массиве. Борные минералы легко растворяются кислотами. К борсолевым рудам относят: лангбейнит-полигалитовую руду (галит – 49,5 %, полигалит – 3,6 %, сильвин – 5,5 %, калиборит – 4,1 %, магнезит – 0,97 %) и карналлит-кизеритовая руда (галит – 47,6 %, ангидрит – 1,7 %, полигалит – 1,9 %, кизерит – 14,1 %, сильвин – 0,45 %, борацит – 3,22 %, преображенскит – 1,9 %).

Были проведены экспериментальные работы по извлечению бора из руд, предварительно разрушенных взрывом и залитым раствором, представляющим собой насыщенный раствор хлористого натрия, подкисленный до 5 % серной кислотой. Было установлено, что в течение 15 суток содержание окиси бора B_2O_3 в рудах составляло 0,12–0,2 условных единиц при высокой степени извлечения в раствор. При этом процесс выщелачивания оксида бора происходил без растворения пород, вмещающих рудное тело.

6.2. Подземное выщелачивание полезных ископаемых

Использование метода подземного выщелачивания (ПВ) для добычи цветных металлов известно с XV1 века. О целесообразности выщелачивания меди из рудников Урала писал М.В. Ломоносов. Первый патент на подземное выщелачивание золота в России был выдан в 1886

году. Промышленное применение выщелачивания медных руд в США начато в 1919 году, в России – с 1939 года. С конца пятидесятых годов XX века метод начал применяться для добычи урановых руд. В настоящее время подземное и кучное выщелачивание металлов применяется на многих предприятиях США, Португалии, Австралии, Мексики, Японии, России и др. Так, например, на долю США в 1986 году приходилось 266 тыс. т/год меди, полученной этим методом. Такой значительный уровень производства меди обусловлен прежде всего вовлечением в переработку большого количества окисленной руды с невысоким содержанием меди. Наиболее крупное предприятие подземного выщелачивания меди в США производит 21,6 тыс. т меди в год. На предприятиях Мексики, Португалии, Японии сырьём при подземном выщелачивании являются халькозиновые руды, потерянные при горной добыче, и руды окисленных верхних зон месторождений. В основном медь получают разбрызгиванием выщелачивающих растворов по поверхности в зоне обрушения месторождений и в ряде случаев – подачей растворов через скважины.

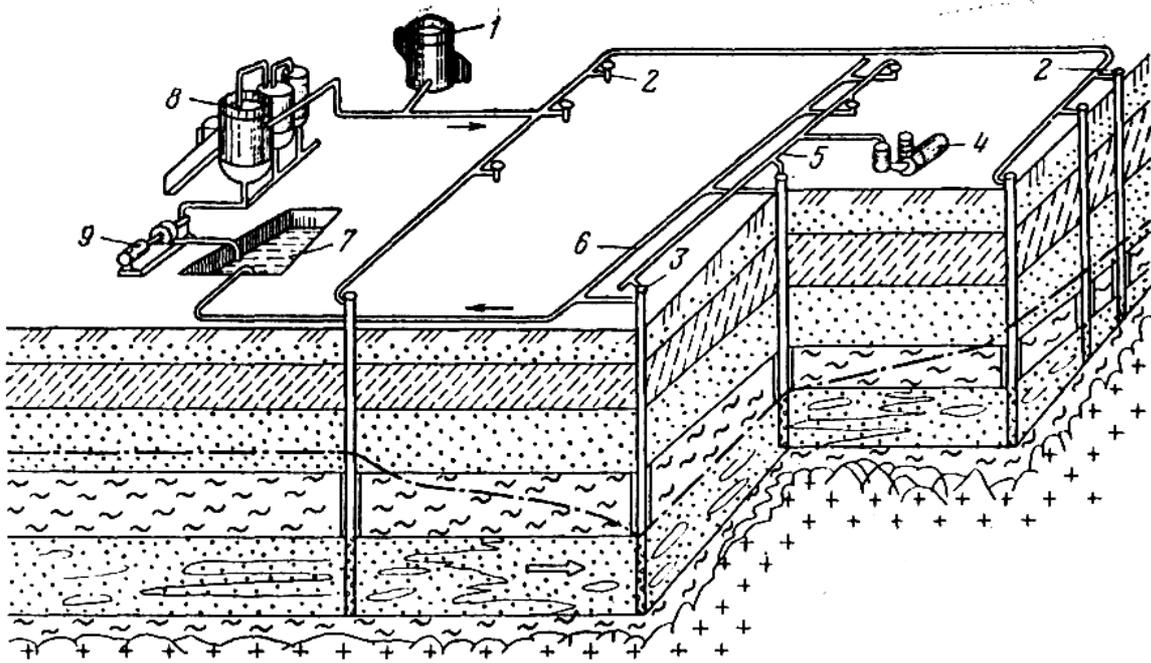


Рис. 6.2. Схема отработки пластового месторождения выщелачиванием через скважины: 1 – узел приготовления раствора; 2 – нагнетательная скважина; 3 – дренажная скважина; 4 – компрессор; 5 – воздухопровод для эрлифта; 6 – коллектор для продуктивного раствора; 7 – отстойник; 8 – установка для переработки раствора; 9 – насос.

В России широко применяется подземное выщелачивание урана, в 60-е годы начато внедрение подземного и кучного выщелачивание цветных металлов и золота. Ведутся экспериментальные работы по применению выщелачивания для добычи титана, ванадия, марганца, железа, никеля, цинка.

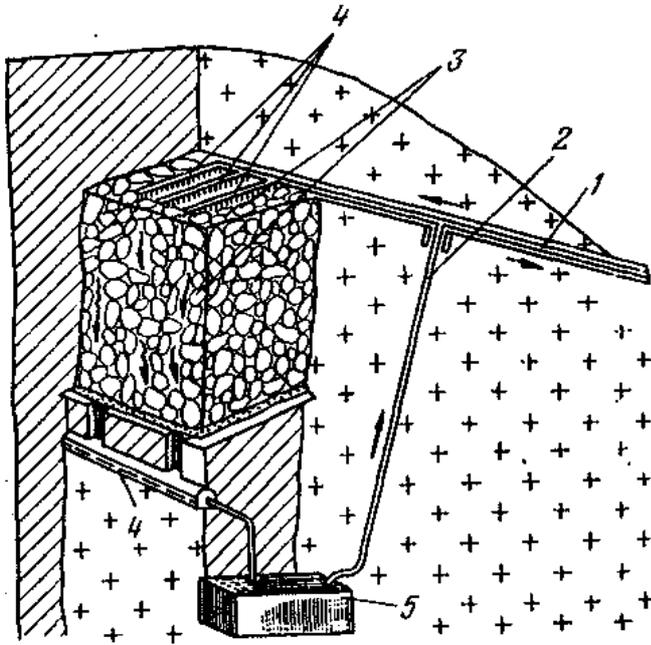


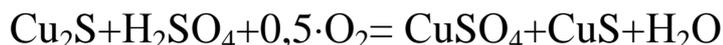
Рис. 6.3 Схема подземного выщелачивания с использованием горных выработок:

- 1 – трубопровод для рабочих агентов;
- 2 – трубопровод для подъёма продуктивного раствора;
- 3 – взорванный блок руды;
- 4 – трубопровод для орошения рудного массива;
- 5 – общий раствороприёмник.

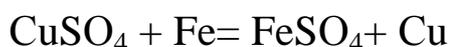
В основном медь получают разбрызгиванием выщелачивающих растворов по поверхности в зоне обрушений месторождений и в ряде случаев – подачей растворов через скважины. В России широко применяется подземное выщелачивание урана, в 60-е годы начато внедрение подземного и кучного выщелачивания цветных металлов и золота. Ведутся экспериментальные работы по применению выщелачивания для добычи титана, ванадия, марганца, железа, никеля, цинка.

Под термином подземное выщелачивание понимают метод добычи полезного ископаемого путём избирательного растворения его на месте залегания и последующего извлечения образованных в зоне реакции химических соединений на поверхность. Подземное выщелачивание в зависимости от геотехнологических свойств обрабатываемых месторождений осуществляется через скважины, пробуренные с поверхности к рудам, обладающим естественной фильтрацией (рис. 6.2), путём обычной шахтной подготовки месторождения с отработкой отдельных блоков руды системами с выщелачиванием (рис. 6.3) или их различными сочетаниями, то есть шахтная подготовка месторождения и скважинное выщелачивание. Кроме этого, технология кучного и от-

вального выщелачивания основана на тех же принципах извлечения полезного ископаемого. Под термином «кучное выщелачивание» понимается реагентное извлечение полезного компонента из раздробленной и уложенной в кучу руды на специально складированные раствороорошаемые площадки. Отвальное выщелачивание – это выщелачивание полезных компонентов из старых отвалов бедных руд. Например, подземное выщелачивание меди из халькозина Cu_2S происходит в следующем порядке:



Раствор CuSO_4 пропускают через слой железа (Fe):



FeSO_4 используется как рабочий агент для ПВ металлов.

Для ПВ перспективны:

- месторождения в сильно обводненных и неустойчивых осадочных породах; сюда следует отнести большое число месторождений урана, сформировавшихся в зоне перехода от окислительной к восстановительной обстановке;
- руды зоны окисления сульфидных месторождений, где уран и медь находятся в форме легко растворимых минералов;
- забалансовые участки месторождений, отработанных обычными методами;
- крупные и глубоко залегающие месторождения с бедными рудами;
- отвалы действующих и отработанных месторождений.

Для подземного выщелачивания свинца и цинка могут быть использованы сульфидные руды в отработанных пространствах и оруденелых боковых породах рудников.

Большие перспективы открывает применение ПВ в железорудной промышленности, например подземное выщелачивание бурых железняков.

Широкое применение ПВ может найти в золотодобывающей промышленности, на месторождениях, как правило, со сложным строением, расположенных вдали от освоенных промышленных районов и в неблагоприятных климатических условиях и поэтому большей частью отнесенных к забалансовым.

Применение геотехнологических методов при разработке месторождений фосфатных руд не менее важно, чем при эксплуатации месторождений руд цветных металлов. Многие фосфатные месторождения нашей страны из-за сложности залегания и трудной обогатимости руд в ближайшей перспективе не могут быть разработаны традиционными методами. Одним из основных препятствий на пути развития метода выщелачивания является низкая скорость растворения, обусловленная нахождением металлов в труднорастворимых соединениях. В связи с этим большое внимание уделяется разработке способов интенсификации процесса. Намечились два основных направления исследований – применение бактерий и наложение на выщелачиваемый массив различных полей. К ним относятся подогрев растворителя или предварительный обжиг руды под землей (В.А. Щелканов), наложение электрического тока, высокочастотного электромагнитного поля (Н.В. Петров, Н.К. Руденко, Ю.Н. Рыбаков), воздействие ультразвука и вибрации (В.С. Ямщиков), а также бактериальное воздействие. Анализ различных способов интенсификации выщелачивания показывает, что все они ускоряют процесс и повышают степень извлечения полезного компонента в несколько раз. Однако они не универсальны и могут применяться в зависимости от условий конкретных месторождений.

Наиболее интенсивные исследования в настоящее время ведутся по бактериальному методу интенсификации подземного выщелачивания. Бактерии, способствующие выщелачиванию полезных компонентов из руд, называются «хемолитотрофами» – пожирателями камня. Энергию они получают за счет окисления неорганических веществ. Автотрофные микроорганизмы получают углерод из углекислого газа атмосферы. Палочковидная бактерия и другие относятся к ацидофилам – «любящим кислоту». Свою энергию эти бактерии получают за счет окисления либо железа, либо серы (ион двухвалентного железа при участии бактерий превращается в ион трехвалентного железа – окисная формула) и образуют серную кислоту, а из нерастворимых сульфидов меди с помощью бактерий образуется хорошо растворимая сернокислая медь.

Принято считать, что бактериальное выщелачивание бывает прямым и косвенным. К первому относится действие ферментов микроорганизмов на компоненты минералов, которые могут быть окислены. При косвенном выщелачивании, например при переводе железа из

двух-в трехвалентное, получают окислитель, способный взаимодействовать с другими металлами, чем ускоряется процесс выщелачивания.

К числу неблагоприятных для жизни бактерий факторов относятся: высокая концентрация металлов в растворе, особенно серебра и ртути, нехватка воздуха, высокая или низкая температура.

В настоящее время трудами С.И. Кузнецова, М.В. Иванова, Г.А. Заварзая, С.И. Полькина и их сотрудников заложены научные основы рудничной микробиологии, изучена роль бактерий в образовании и разрушении месторождений, а также разработаны основы технологии бактериального выщелачивания цветных, редких и благородных металлов.

Бактериальное выщелачивание используют для добычи меди и урана, но известно, что бактерии разрушают и другие сульфидсодержащие минералы, например сфалерит, галенит. Их интересно использовать при кучном и подземном выщелачивании никеля, кобальта.

Микробиологические процессы очень чувствительны к погоде, химическому составу руды, концентрации кислоты и поэтому в настоящее время еще не могут использоваться в промышленности, но в будущем с их помощью можно будет эксплуатировать геотехнологическими методами многие ныне не эффективные для разработки месторождения полезных ископаемых.

При окислении сульфидных руд превращению подвергаются неорганические вещества и прежде всего сульфидная сера. Тионовые бактерии способны развиваться в кислых средах. Палочковидные бактерии играют при окислении сульфидных руд двойную роль, окисляя сульфиды и образуя при окислении закисного железа окись сернокислого железа $Fe_2(SO_4)_3$ – сильный химический окислитель сульфидов. Эти бактерии способны окислять сульфидные минералы: пирит, марказит, пирротин, халькопирит, борнит, ковеллин, халькозин, тетраэдрит, эпаргит, арсенопирит, реальгар, аурипигмент, кобальтин, пентландит, вибларит, бравоит, миллерит, полидемит, антимонит, молибденит, сфалерит, марматит, галенит, геокранит.

Образовавшееся в процессе химической реакции сернокислое закисное железо $FeSO_4$ окисляется в процессе реакции до сернокислого окисного железа $Fe_2(SO_4)_3$. Разница между химическим и микробиологическим процессами заключается в том, что основной выщелачивающий агент $Fe_2(SO_4)_3$ при химическом выщелачивании нужно вводить извне, а при выщелачивании с помощью бактерий он легко регенериру-

ется из серноокислого закисного железа. Кроме того, бактерии быстро окисляют сульфидные минералы, ускоряя тем самым выщелачивание меди из руд.

Из окисленных руд медь легко извлекается при химическом выщелачивании растворами серной кислоты. Из сульфидных минералов медь может быть извлечена только после их окисления. Многими исследователями (М.В. Ивановым, Н.Н. Ляликовой и др.) было показано, что халькопирит (главный медьсодержащий минерал), наиболее трудноокисляемый сульфид для выщелачивания, при воздействии палочковидных бактерий резко увеличивает скорость процесса окисления, что позволяет за 12 дней выщелочить 72 % меди против 5 % за 24 дня, полученных в контрольном опыте без бактерий. По данным Т. Рассела, в присутствии палочковидных бактерий из халькозина Cu_2S выщелочено в 3 раза, а в присутствии еще и серноокислого закисного железа в 6 раз больше меди, чем в контрольном опыте.

В Болгарии для интенсификации бактериального выщелачивания проведены опыты по влиянию электрического тока на скорость окисления сульфидов меди. В лабораторном перколяторе анод помещался в руду, катод – в камеру регенерации раствора. Затем подавалось напряжение 12 В. В результате извлечение меди увеличилось на 68 % (по сравнению с контрольным опытом). Таким образом, при протекании небольшого тока (до 12 мА) химические, микробиологические и электрохимические явления в системе ускоряются.

Изучено влияние бактерий на интенсивность выщелачивания цинка, никеля, сурьмы, свинца, олова. Опыты Т. Рассела показали, что сульфиды цинка (сфалерит и марматит) в присутствии палочковидных бактерий окисляются значительно быстрее. Из руды за 15 дней цинк выщелочен более чем на 90 %. Им же изучалась интенсификация выщелачивания никеля из миллерита. В присутствии бактерий за 28 суток выщелочено 58 % никеля против 10 % в контрольном опыте. Опыты, проведенные на месторождениях Кольского полуострова, показали, что в этих условиях сульфиды никеля окисляются бактериями.

Многочисленными лабораторными исследованиями показано, что бактерии косвенно способствуют окислению сульфидов (носителей редких элементов) и влияют на миграционную способность рудного металла.

Проведены первые опыты по изучению роли микроорганизмов при выщелачивании золота, которые показали, что бактерии способны

растворять золото. Содержание золота в растворе достигало 1,5 мг/л. Некоторые бактерии оказались очень активными и растворяли до 10 мг/л золота. Золото, перешедшее в раствор, извлекалось путем осаждения на активированный уголь. В ВИМСе (Симферополь) исследовано микробиологическое выщелачивание бокситов для удаления кремнезема в раствор силикатными бактериями. В России, США выполнены исследования по микробиологическому выщелачиванию марганцевых руд. На многих рудниках, где ведется подземное или кучное выщелачивание бедных руд, интенсификация процесса достигается с помощью микроорганизмов. Процесс выщелачивания меди ведется циклично с регенерацией растворов после цементации меди в Бингамском каньоне (США) с годовой добычей меди свыше 70 тыс. т.

Все вышеизложенное показывает, что по отношению к урану и меди и даже золоту метод ПВ уже достаточно изучен для промышленного применения. Однако существует ряд вопросов, решение которых позволит расширить сферу его применения и улучшить технико-экономические показатели.

Для ориентировочного расчета параметров процесса ПВ необходимо:

1. Получить исходные данные, содержащие характеристику физико-геологических условий месторождения (глубина залегания, мощность и площадь месторождения, содержание полезного компонента и вредных примесей, вещественный состав, коэффициент фильтрации, эффективная пористость, уровень воды над кровлей продуктивной залежи и т. д.).

2. Подобрать растворитель, а в лабораторных опытах с реальной рудной массой установить его селективность, газовую составляющую и рассчитать необходимый удельный объем раствора на обработку 1 т руды (Ж: Т).

3. Определить параметры технологии, зная (Ж: Т), рассчитать необходимое количество раствора для отработки месторождения как произведение объема руды на удельный расход реагента на выщелачивание 1 т руды, а также, задавшись производительностью рудных по объему продуктивных растворов, определить срок отработки месторождения по принятому годовому числу часов работы предприятия и часовую производительность узла приготовления рабочих растворов.

Из гидрогеологических исследований и опытных работ определяется средняя приемистость добычных скважин.

Зная приемистость добычных скважин и часовую производительность узла приготовления рабочих растворов, можно определить число закачных скважин, а в зависимости от принятой системы разработки – и число откачных скважин.

Продолжительность работы добычной скважины определяется ее дебитом, запасами полезного ископаемого в зоне действия скважины и коэффициентом извлечения, который устанавливаются лабораторными опытами (технологический коэффициент извлечения), а также коэффициентом охвата.

Получив все технологические параметры, можно установить основные экономические показатели метода.

Содержание и основные этапы научно-исследовательской разработки технологии подземного выщелачивания:

- предварительные исследования;
- лабораторные исследования;
- полевые (опытные) исследования;
- опытно-промышленные исследования.

Предварительные исследования:

1. Оценка по геологоразведочным данным запасов месторождения, не пригодных для отработки традиционными методами, определение принципиальной возможности ПВ с учетом химического и вещественного состава руды и вмещающих пород, их структурных и текстурных особенностей.

2. Анализ регионального размещения возможных источников реагентов, энергии, потребителей сырья, коммуникаций.

Лабораторные исследования:

1. Изучение на пробах руды разных типов реагентов при различных концентрациях, выбор рациональной концентрации реагента, его нормы, кислотоемкости руды, состава продукционных растворов. Определение кинетических коэффициентов процесса выщелачивания.

2. Исследование на линейных моделях закономерностей фильтрации реагента в слое руды, определение влияния коагуляционных явлений, установление зонального распределения процесса выщелачивания и закономерностей изменения состава продукционного раствора в зависимости от скорости фильтрации давления, температуры и др. Уточнение концентрации и нормы реагента, рациональной степени извлечения, селективности.

3. Определение на плановых (объемных) моделях закономерностей взаимодействия эксплуатационных скважин, оценка возможной степени разбавления и потерь растворов.

4. Выбор и опробование схемы переработки продукционных растворов, анализ качества продукта и состава отходов, определение расходных коэффициентов.

5. Предварительный расчет параметров процесса ПВ в опытных масштабах и технико-экономическая оценка.

Полевые (опытные) исследования:

1. Выбор представительного участка месторождения, его детальное геолого-гидрогеологическое изучение. Бурение куста опытных скважин, определение с помощью индикаторов возможных границ распространения ореола загрязнений пластовых вод, выбор и опробование дополнительных защитных мероприятий (барражных скважин, гидро- и аэрозавес, дебаланса откачки и закачки и т. п.).

2. Проведение пробных закачек (наливов) реагента при значительном (4 – 5-кратном) превышении дебита откачки, уточнение лабораторных данных. Выбор технологического оборудования.

3. Проведение опытных работ по ПВ совместно с наземной переработкой продукционных растворов, уточнение расходных коэффициентов, определение возможности замкнутого водооборота, уточнение степени извлечения полезного компонента, потерь растворов, определение эффективности защитных мероприятий и работоспособности оборудования.

4. Уточнение методики расчета технологических параметров, проверка товарного качества полученного продукта, разработка технико-экономического обоснования промышленного освоения метода.

Опытно-промышленные исследования:

1. Уточнение в укрупненных масштабах опытных данных, определение влияния взаимодействия добычных участков на различных стадиях отработки, оценка экологических изменений в районе участка отработки, опробование средств контрольно-измерительных приборов и автоматики, определение конкретных технико-экономических показателей метода, разработка рекомендаций на промышленное производство.

2. Доразведка месторождения и уточнение промышленных запасов под ПВ.

Для успешного решения проблемы подземного выщелачивания необходимо:

1. Дать комплексную оценку геологической базы подземного и кучного выщелачивания.
2. Разработать эффективные методы подготовки месторождений;
3. Изучить кинетику гетерогенных реакций кислотного и щелочного разложения руд.
4. Установить закономерности нейтрализации кислотных растворов при взаимодействии их с горными породами и определить расстояния миграции кислых растворов в подземном потоке для прогнозирования полной их нейтрализации.
5. Разработать и внедрить сорбционную и экстракционную технологии выделения металлов из растворов выщелачивания с использованием дешевых промышленных ионитов и экстрагентов.
6. Разработать технологические схемы выщелачивания, позволяющие повысить комплексность использования сырья.
7. Разработать и внедрить эффективные методы интенсификации процессов выщелачивания.

6.3. Подземная выплавка полезных ископаемых

Основными объектами промышленного освоения способа подземной выплавки полезных ископаемых являются месторождения самородной серы. Наиболее полно этот способ описан в работе. Самородную серу содержат известняковые серные руды, где она находится в виде отдельного несвязного вещества. До 70 % всего производства первоначально приходилось на месторождения самородной серы, так как ее удобнее и легче перерабатывать. Однако с середины 80-х годов в связи с необходимостью утилизации серы, содержащейся в нефти, природном газе и получающейся при коксохимическом и металлургическом производствах, доля серы, получаемой при разработке месторождений самородной серы, постоянно снижается и составляет только около 30 %.

В бывшем СССР добыча природной серы составляла 3,5 тыс. т из общего количества ее производства 5,5 тыс. т, т. е. около 64 %.

Серу добывают различными способами, но наиболее универсальным является способ подземной выплавки, которым можно разрабатывать до 50 % промышленных запасов серных месторождений, залегающих

щих на глубинах от 120 до 600 м и более. При этом коэффициент извлечения достигает 40 %. Основными производителями самородной серы являются Иран, Мексика, США и Чили. Из 12 млн т серы, полученной в мире в 1986 году, 4 млн т добыты способом подземной выплавки.

Способ подземной выплавки серы (ПВС) (метод Фраша) был предложен в 1890 году применительно к месторождениям Мексиканского залива и начал применяться с 1894 года в штате Луизиана в США. С 1912 года уже половина мирового производства серы добывалась этим способом.

В бывшем СССР добыча серы начинает развиваться с 30-х годов, когда были открыты месторождения в Поволжье и Туркмении. В 50-х годах открыты месторождения Предкарпатья на Украине, на базе которых были созданы Роздольское (1958 г.) и Яворовское (1970 г.) производственные объединения по добыче серы. На территории современной России из разрабатываемых находится только Водинское месторождение самородной серы в Среднем Поволжье. В бывшем СССР метод подземной выплавки серы начали применять с 1968 года при разработке месторождений Предкарпатья, а также Гаурдакского месторождения.

Различают четыре геотехнологических способа получения серы из самородных руд:

1. Выплавка горячей водой.
2. Возгонка или экстракция.
3. Выплавка за счет сжигания части серы.
4. Выплавка токами высокой частоты.

Широко применяют только подземную выплавку серы горячей водой, на которую приходится 83 % всей добычи геотехнологическими способами.

Процесс добычи основан на теплообмене между теплоносителем (горячая вода), подаваемым через скважины с поверхности, и рудным массивом. При этом используют свойство серы плавиться при температуре 112,8–119 °С.

Способ ПВС основан на бурении скважин с поверхности обычными буровыми станками, обсадке их трубами до серосодержащей залежи и цементации скважины. Принципиальная схема добычной скважины при способе ПВС представлена рис. 6.4.

Скважину пробуривают до залежи, после чего спускают обсадную колонну 1. Для обеспечения герметичности скважины осуществляют затрубную цементацию 2. После этого скважину пробуривают на всю

мощность залежи. В пробуренную скважину опускают три concentрически расположенные колонны труб: водоподающую 5, серную 4, воздушную 3. Диаметры колонн труб равны соответственно 6", 3", 1". Устье скважины оборудуют оголовком, обеспечивающим подачу горячей воды в зазоре между шести- и трехдюймовыми трубами.

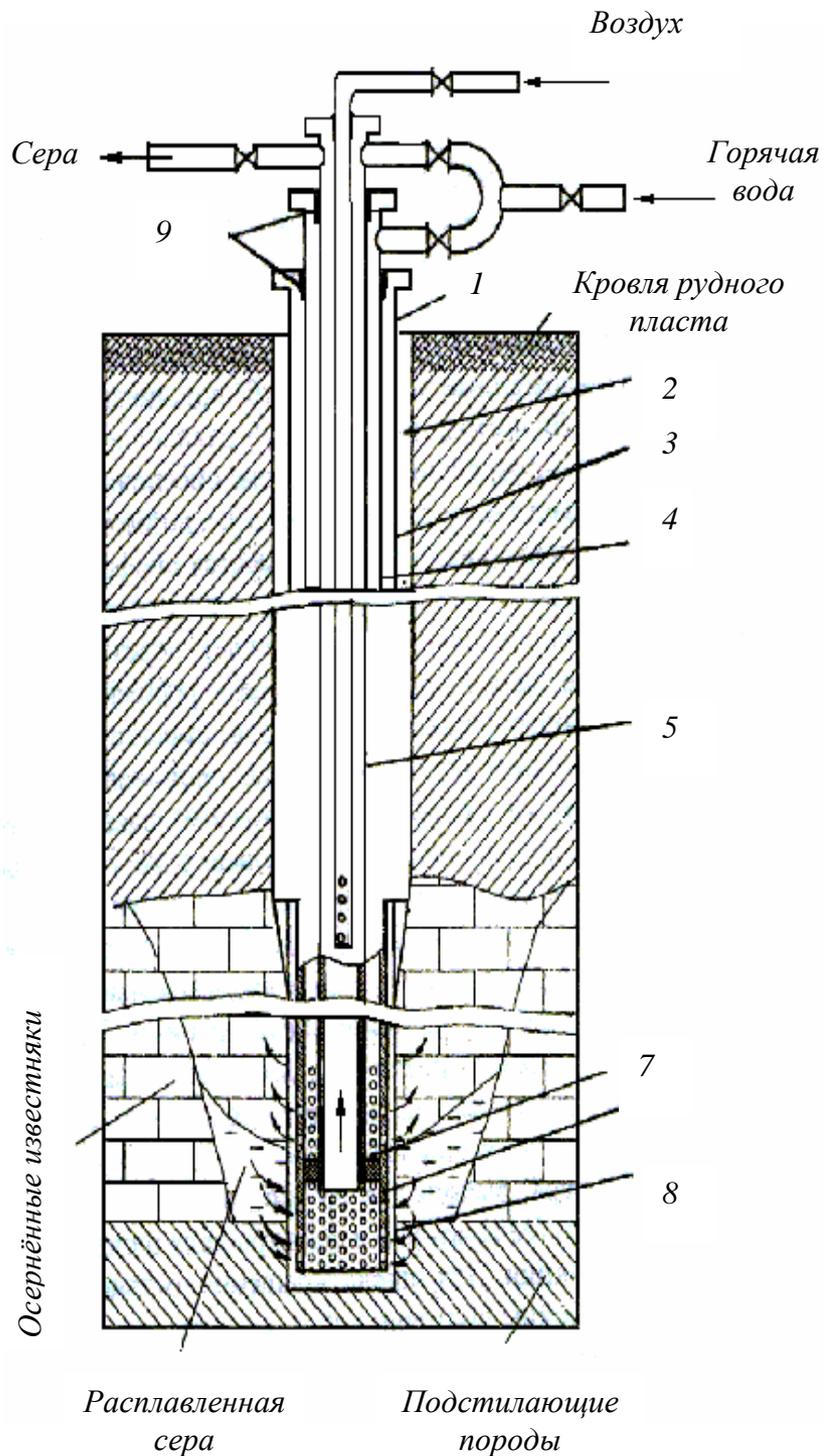


Рис. 6.4. Принципиальная схема добычной скважины при способе ПВС

В нижней части водоподающей колонны имеется перфорация, которая с помощью разделительного пакера б делится на верхнюю – водяную 7 и нижнюю – серную 8. Горячая вода поступает через верхнюю перфорацию в сероносную залежь, разогревает ее и расплавляет серу. Расплавленная сера, более тяжелая, чем вода, стекает к скважине и скапливается в нижней части скважины, проникая через нижнюю перфорацию в серную колонну. Высоту подъема расплавленной серы по скважине определяет гидростатическое давление у почвы залежи. Воздушная колонна должна быть опущена ниже верхнего уровня серы в серной колонне. Подачей по однодюймовой трубе сжатого воздуха расплавленная сера эмульгируется и выдается на поверхность в промежутке между трех- и однодюймовой трубами. Так как степень прогрева отдельных колонн различна, для компенсации температурных колебаний в устье скважины между отдельными трубопроводами установлены сальниковые компенсаторы 9.

Расплавленная сера, выходящая из скважины, направляется через отстойные резервуары (сепараторы) в фильтры для очистки и далее на склад готовой продукции. Для предотвращения остывания серы все трубопроводы и бассейны постоянно обогреваются.

В результате непрерывной закачки горячей воды в массив возрастает пластовое давление. Для его регулирования и управления технологическим процессом добычи серы сооружают водоотливные скважины. Очень важным является экономия теплоносителя, так как затраты на его приготовление составляют более половины общих расходов.

Параметры технологии определяются условиями залегания рудной залежи и свойствами руды и вмещающих пород: мощность залежи, трещиноватость и пористость рудного массива, содержание серы, гидродинамический режим рудного тела, подвергаемого разработке и т. д.

Разработку начинают после обустройства месторождения или его участка добычными скважинами. Расположение скважин и порядок их включения являются основными вопросами проектирования и эксплуатации месторождения. Они определяют такие важнейшие технологические и экономические параметры, как степень извлечения серы, производительность скважины, время работы скважины, степень взаимного влияния скважин (интерференция), удельный расход теплоносителя, объем капитальных затрат, себестоимость и т. п.

В процессе длительной эксплуатации добычных скважин возникают различного рода неполадки, приводящие к прекращению выдачи

серы. Для их предотвращения рекомендуется периодически поворачивать колонны труб и промывать затрубное пространство и перфорацию раствором каустической соды.

Схема расположения скважин на месторождении зависит от гидрогеологических условий залежи и может быть линейной (скважины добычные, промежуточные, водоотливные) или блочной (добычные скважины располагаются в шахматном порядке в виде ячеек). Блок-ячейки выделяются на основе анализа гидрогеологических условий рудной залежи по разреженной сетке.

Экономическую эффективность способа определяют следующие параметры:

- капитальные затраты на технологический комплекс поверхности (котельная, компрессорная, здания и сооружения);
- капитальные затраты на сооружение скважины;
- запасы, отрабатываемые одной скважиной;
- эксплуатационные расходы на добычу;
- время работы скважины;
- срок службы предприятия.

С целью повышения эффективности ПВС проводились многочисленные научно-исследовательские работы по ее совершенствованию, не нашедшие, однако, широкого применения на практике. К основным из них относят:

- использование теплоносителей большой плотности, так как от этого зависит конусность зоны плавления, что во многом определяет коэффициент извлечения серы из массива; однако применение рассолов, в т. ч. морской воды, и суспензий существенно усложняет процесс и приводит к выходу из строя оборудования из-за коррозии и кольматации каналов;

- бурение наклонных скважин, т. к. вертикальные быстро выйдут из строя в результате сдвижения массива пород при его подработке;

- использование в качестве теплоносителя дымовых газов, получаемых в котельной на поверхности или с помощью специальной горелки, опускаемой в скважину;

- использование для прогрева массива электролиза или погружного электронагревателя;

- использование для прогрева массива энергии взрыва, в т. ч. атомного.

Основные технико-экономические показатели способа подземной выплавки серы, полученные на предприятиях бывшего СССР, следующие:

- удельный расход теплоносителя – 17–30 м³/т;
- удельный расход сжатого воздуха – 30 м³/т;
- извлечение серы из недр – 40 %.

Область применения способа подземной выплавки постоянно расширяется. Ведутся масштабные работы по освоению этим способом месторождений ртути, битумов, высоковязкой нефти и других полезных ископаемых. Совершенствование подземной выплавки осуществляется за счет изменения температуры теплоносителя, добавления в его состав поверхностно-активных веществ и др.

6.4. Разработка тяжёлых нефтей и битумов геотехнологическими методами

Обычные методы добычи нефти не могут обеспечить извлечения нефти более 50–60 %. Поэтому разработаны специальные методы воздействия на нефтяные пласты с целью повышения нефтедобычи. Эти методы основаны на воздействии на призабойную зону скважин и нефтяные пласты гидравлического разрыва пласта, на заводнении и физико-химическом воздействии на нефтяной пласт.

Тяжёлые нефти и битумы в естественном виде в пластах неподвижны или малоподвижны, почти отсутствуют газы, плотность близка 1000 кг/м³, вязкость более 1000 МПа·с; разработка их возможна только с использованием теплоты, т. е. термическими методами.

Запасы битума в мире оцениваются примерно в 250–300 млрд т, что на порядок выше запасов нефти. В России основные запасы битума сосредоточены в Волго-Уральском регионе и Восточной Сибири.

Для дренирования тяжелых нефтей и битумов требуется бурение очень большого количества скважин на расстоянии 5–20 м друг от друга. Установлено, что равномерный прогрев тяжёлых нефтей и битумов возможен только при бурении до 100 скважин на гектар, и извлекаемость при это составит 25–50 %.

Варианты термических методов добычи тяжелой нефти показаны на рис. 6.5.

Перспективна технология подземного растворения тяжелой нефти водой, нагретой до 300 °С и подаваемой под давлением более 20 МПа.

С 1930 года известен метод электрического прогрева забоя скважин; температура прогрева колеблется в пределах 50–150 °С. Однако этот метод требует очень больших затрат электроэнергии и значительного усовершенствования.

Заслуживает внимания геотермическая технология, основанная на создании в пласте очага горения; в качестве окислителя служит атмосферный воздух, нагнетаемый в пласт, а в качестве топлива – часть пластовой нефти или закачиваемая в пласт газоздушная смесь.

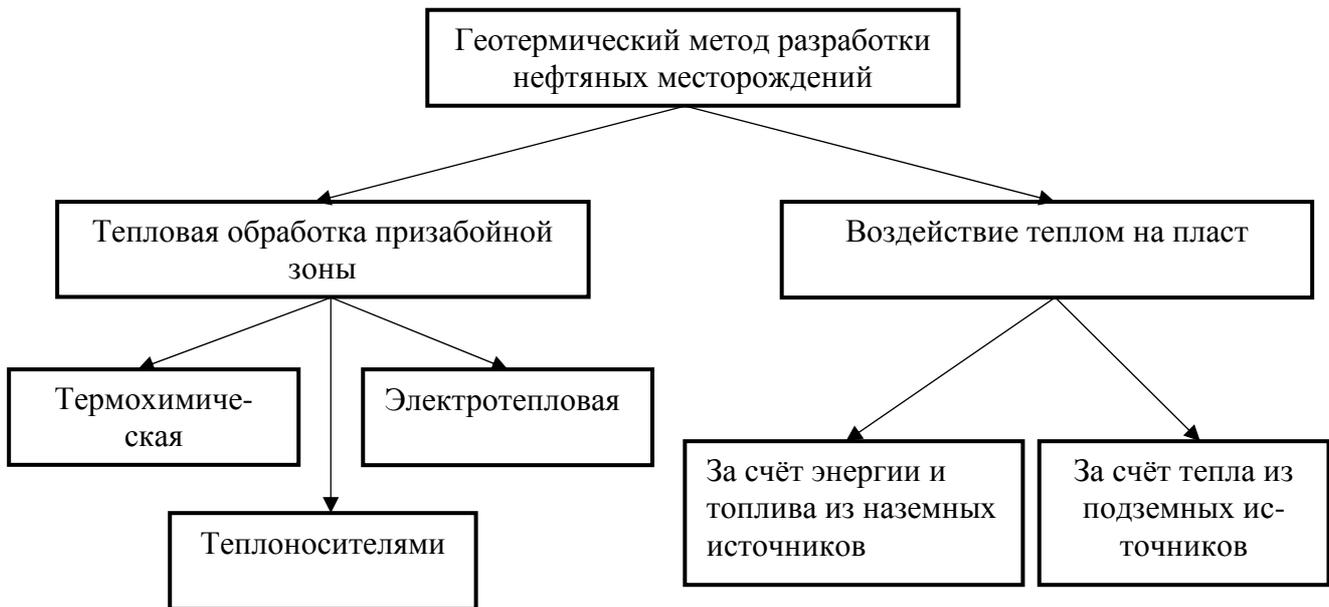


Рис. 6.5. Геотермические методы разработки нефтяных месторождений (по А.Б.Шейнману)

Все указанные выше методы добычи тяжелых нефтей и битумов пока не дали хороших результатов, что требует расширения методов поиска эффективных решений.

6.5. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых

Скважинная гидродобыча (СГД) – метод подземной добычи твердых полезных ископаемых, основанный на приведении полезного ископаемого на месте залегания в подвижное состояние путем гидромеханического воздействия и выдачи его в виде гидросмеси на поверхность.

Основными технологическими процессами при скважинной гидродобыче являются: вскрытие месторождения с помощью скважин, гидравлическое разрушение (размыв) полезного ископаемого напорной струей воды (в осушенном или затопленном очистном пространстве), дезинтеграция и перевод в забое разрушенной массы в гидросмесь, транспортирование (самотечное или напорное) гидросмеси от забоя до пульпоприемной скважины (выработки), подъем гидросмеси на поверхность, обогащение, складирование хвостов обогащения, осветление оборотной воды и водоснабжение, управление горным давлением. Принципиальная технологическая схема скважинной гидродобычи приведена на рис. 6.6.

Способ скважинной гидродобычи предложен советским инженером В.Г. Вишняковым в 1935 году. Он использовался при разработке фосфоритов и песков для стекольной промышленности в 60-х годах в Польше и рассыпного золота в 70-х годах в Канаде.

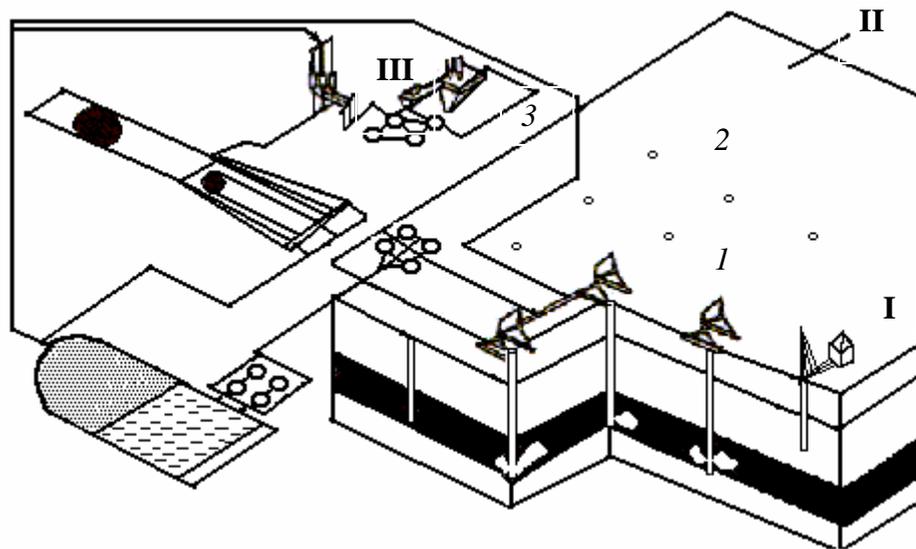


Рис. 6.6. Принципиальная технологическая схема скважинной гидродобычи: I – участок скважинной гидродобычи; II – участок повторной обработки целиков выщелачиванием; III – участок обогащения

Основные работы по созданию промышленных образцов технических средств и технологических схем проведены в 70-х годах. С 1970 года в США серийно выпускают установки скважинной гидродобычи, используемые для добычи мягких бокситовых руд нефтеносных песчаников, урана. Промышленная разработка месторождений

ураноносных песчаников способом скважинной гидродобычи начата в США с конца 1979 года.

В СССР и России скважинную гидродобычу применяли при добыче фосфоритов, а также обводненных крупнозернистых песков, залегающих под слоем многолетней мерзлоты в районе нефтяных месторождений Тюменской области для создания промышленных площадок буровых установок.

Обычно методом скважинной гидродобычи разрабатываются рыхлые, слабосцементированные руды.

Перспективными для этого метода являются все легкодиспергируемые, пористые, рыхлые и слабосвязные залежи полезных ископаемых, к которым относят: месторождения торфа, фосфорит- и марганецсодержащие отложения, россыпные месторождения золота, олова, янтаря, алмазов, титана, осадочные месторождения редких и радиоактивных руд, мягкие бокситовые руды, битуминозные песчаники, угли, горючие сланцы и т. п.

Скважинную гидродобычу можно применять как самостоятельный способ геотехнологической разработки, так и в комбинации с последующим подземным выщелачиванием при разработке песчано-глинистых и глинистых отложений.

Способ СГД можно использовать как вспомогательный (подготавливающий) для повышения эффективности подземного выщелачивания в залежи полезного ископаемого с недостаточной естественной проницаемостью.

Скважинную гидродобычу можно использовать для разведки (опробования) осадочных и россыпных месторождений, залегающих в сложных горно-геологических условиях, так как она позволяет повышать достоверность геологоразведочных данных и поднимать на поверхность большие технологические пробы весом до 100 т и более.

В соответствии с технологической схемой, приведенной на рис. 6.6, на предприятии выделяют три участка: I – участок скважинной гидродобычи; II – участок повторной обработки целиков выщелачиванием; III – участок обогащения.

На участке повторной обработки целиков выщелачиванием используют те же скважины, что и на участке скважинной гидродобычи, но одни из них являются скважинами подачи растворителя 1, а другие – скважинами откачки раствора для сорбции 2.

Предприятие СГД включает: полигон с разбуренными скважинами и уложенными трубопроводами для подачи сжатого воздуха, напорной воды и гидротранспорта пульпы Z до склада; осветлительный бассейн, насосную и компрессорную станции; электроподстанцию и другие подсобные службы.

Под технологией добычи полезных ископаемых методом СГД понимается совокупность производственных операций по разрушению и смыву руды, увязанная во времени и пространстве. Последовательность их выполнения составляет технологическую схему по способу СГД.

Методы отработки добычной камеры могут отличаться по направлению действия струи гидромонитора и схеме доставки разрушенной руды к всасу выдачного устройства:

- встречным забоем, когда направление разрушающей струи не совпадает с направлением смывающей насадки;
- попутным забоем, когда они полностью или частично совпадают;
- совмещенным забоем, когда струи боковых насадок гидромонитора попутным забоем разрушают пласт руды и смывают ее к всасу пульпоподъемного механизма, а струи передних насадок встречным забоем разрабатывают пласт;
- комбинированным забоем, когда сначала две рядом расположенные камеры отрабатывают встречным или совмещенным забоем, а затем попутным забоем производится отработка междукамерных целиков и зачистка почвы камеры.

Горные породы делят на две группы: с жесткими связями, без жестких связей. Для диспергирования методом СГД наиболее предпочтительны породы без жестких связей. Различают: связные (глинистые, лёссовые) и рыхлые горные породы. Существует несколько методов разрушения пород:

- фильтрационным потоком, когда происходит вымывание отдельных составляющих массива;
- гидромониторной струей, когда происходит разрушение массива и вынос продуктов разрушения.

Наиболее эффективен второй метод разрушения. В результате воздействия струи на забой в нем образуется лунка в форме параболоида, размеры которого зависят от крепости породы и времени воздействия. После удаления разрушенных частиц из лунки в ней образуются

трещины. Если удар наносить под углом к поверхности, происходит отделение частиц от массива.

Итак, отработку очистных камер можно осуществлять встречным, попутным или боковым забоями.

При встречном забое направление самотечного движения потока пульпы противоположно движению гидромониторной струи. Отработка встречным забоем эффективна при разработке мощных залежей полезных ископаемых, превышающих 3 м, любого залегания, а также мало-мощных пологих, наклонных, крутонаклонных и крутых залежей с углами наклона более 6° – 8° , когда уклон почвы забоя обеспечивает эффективное самотечное транспортирование отбитой горной массы к выдачной скважине.

При попутном забое направление движения потока пульпы совпадает с направлением струи, и ее энергию используют не только для отбойки, но и для принудительной доставки отбитой массы полезного ископаемого к выдачному устройству, что позволяет вести отработку тонких и весьма тонких (менее 1 м) пологозалегающих (уклон менее 6°) и горизонтальных залежей полезного ископаемого с минимумом потерь и разубоживания.

При боковом забое по контуру очистной камеры или в центре ее до начала очистной выемки ниже почвы рудной залежи проводят транспортные щели с уклоном более 6° в сторону зумпфа выдачного устройства. Отбитая горная масса смывается струей гидромонитора в указанную щель, где обеспечены условия для эффективного самотечного гидротранспортирования.

Размеры камер определяются главным образом устойчивостью пород кровли залежи. Так как отработку камер ведут без присутствия людей в очистном забое, а средства контроля за состоянием кровли чрезвычайно сложны, размыв осуществляют непрерывно, вплоть до обрушения пород кровли. Время отработки камер невелико, отбойка ведется затопленной струей при подпоре пород кровли жидкостью за счет гидростатического давления, поэтому имеется возможность отрабатывать залежи с неустойчивыми вмещающими породами, разработка которых традиционным подземным способом не эффективна.

Отработку залежи можно осуществлять или одиночными камерами, или сплошным забоем в отступающем порядке с управляемой посадкой кровли. Возможно управление кровлей полной закладкой.

По состоянию очистного пространства в процессе разработки выделяют три технологические схемы скважинной гидродобычи: с отбойкой полезного ископаемого в осушенном очистном пространстве свободными струями, а в затопленном очистном пространстве свободными затопленными струями, с использованием пływунных свойств полезного ископаемого и разрушением несвободными затопленными струями.

Схема скважинной гидродобычи с отбойкой полезного ископаемого в осушенном забое, применяемая при небольших притоках воды, позволяет разрабатывать горные породы значительной крепости, осуществлять эффективную доставку отбитой горной массы, легко управлять очистными работами и горным давлением.

Схема скважинной гидродобычи с отбойкой полезного ископаемого в затопленном забое позволяет вести отработку несвязных залежей полезных ископаемых на больших глубинах в условиях больших водопритоков, в частности под водоемами и на шельфе Мирового океана.

Схема скважинной гидродобычи с использованием пływунных свойств полезного ископаемого, а также превращение полезных ископаемых в псевдопływунное (подвижное) состояние за счет управляемого разрушения естественной структуры массива в связных горных породах применяется при достаточной мощности залежи полезного ископаемого (более 3 м). Для доставки рудной массы в псевдопływунном или пływунном состоянии к выдачному устройству используют давление вышележащих пород.

Основной инструмент для разрушения полезного ископаемого – напорная вода. Обычно это гидромониторная струя воды. Интенсификация разрушения достигается воздействием вибрации, взрыва, химического или микробиологического воздействия. Выдача полезного ископаемого на поверхность осуществляется эрлифтом, гидроэлеватором, погружными насосами или их комбинацией.

Технология СГД включает:

- проведение детальной разведки и планировку поверхности;
- вскрытие месторождения бурением добычных скважин диаметром 250–500 мм до подстилающих пород пласта;
- проведение подготовительных работ по подаче воды, сжатого воздуха, электроэнергии;
- разрушение струей воды руды и выдачу ее на поверхность в виде гидросмеси;
- гидротранспортирование гидросмеси в приемные бункеры.

Системы разработки при СГД могут быть с открытым пространством, обрушением покрывающих пород, закладкой выработанного пространства, комбинированные.

Выбор той или иной системы разработки зависит от конкретных условий залегания месторождения.

Метод скважинной гидродобычи требует еще серьезных научно-технических и опытно-конструкторских проработок для повышения его надежности и расширения области применения.

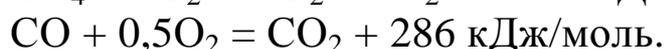
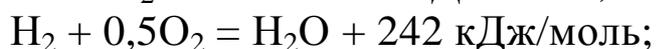
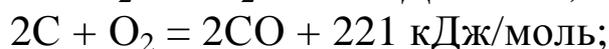
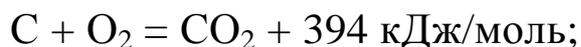
На освоенных месторождениях его эффективность доказана промышленной эксплуатацией. В последние годы существенно возрос объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по распространению способа СГД на месторождениях ископаемых углей со сложными горно-геологическими условиями залегания.

6.6. Подземная газификация угля

Идея подземной газификации угля принадлежит Д.И. Менделееву, который ещё в 1888 году написал: «Настанет, вероятно, со временем даже такая эпоха, что угля из земли вынимать не будут, и там, в земле, его сумеют превращать в горючие газы и их по трубам будут распределять на далёкие расстояния». Им же сформулирован основной принцип ПГУ: «Пробури в пласт несколько отверстий, одно из них должно назначать для введения – даже вдувания воздуха, другое для выхода, даже вытягивания (например, инжектором) горючих газов, которые затем легко провести даже на далёкие расстояния к печам».

Подземная газификация угля (ПГУ) – это термохимический процесс преобразования залегающего в недрах твердого топлива в газообразное состояние. Выведенный на поверхность газ может быть использован в энергетических и химико-технологических целях. Участок угольного пласта, на котором ведется газификация – подземный, газогенератор условно можно разделить на пять зон (рис. 6.7).

В основе процесса ПГУ лежат химические реакции взаимодействия кислорода с углеродом, водородом и метаном:



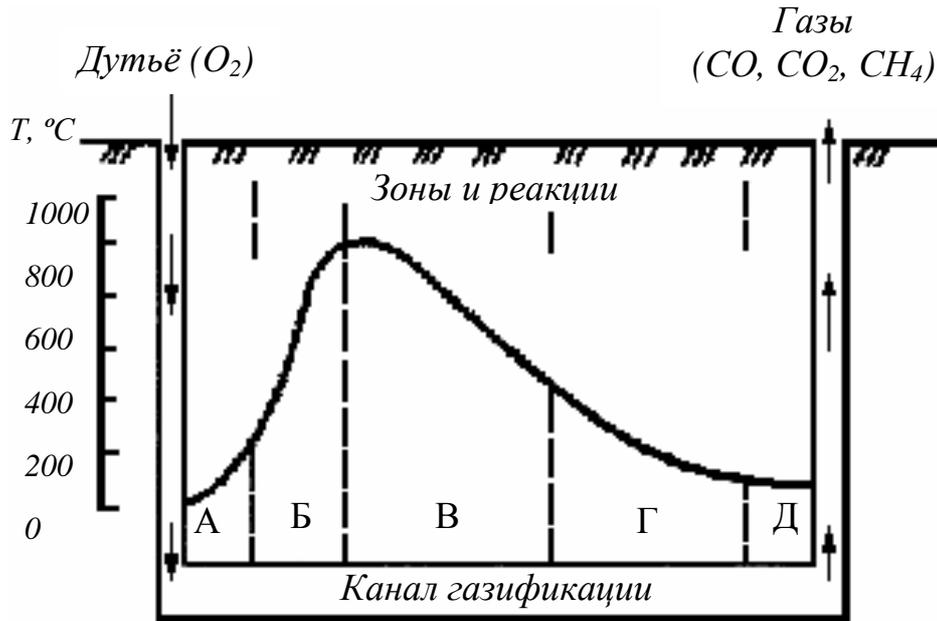
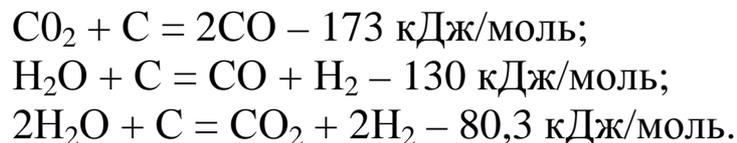


Рис. 6.7. Изменение температуры процессов и характера химических реакций по длине канала газификации и зонам: нагрева пласта (А), окисления (Б), восстановления (В), конверсии (Г), сушки газов и пласта (Д)

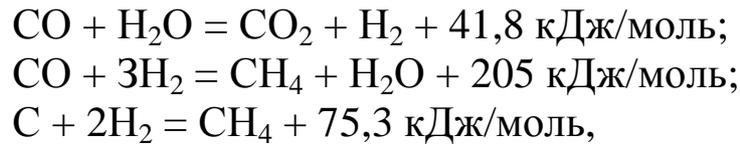
Эти реакции характерны для участка Б – зоны горения. Они проходят со значительным выделением теплоты, которая расходуется на нагревание газов и угольного пласта до температур 1000–1500 °С, а также подогрев участка А до температур 250–300 °С, обеспечивающих сушку угля и его воспламенение. На этом участке активно образуются оксиды CO и CO_2 , а из пласта поступают метан CH_4 и пары воды.

В зоне восстановления (участок В) с углем реагирует в основном не кислород дутья, а газы, поступающие из зоны окисления, поэтому для участка В характерны реакции восстановления CO_2 и водяного пара:



Эти реакции значительно повышают теплоту сгорания газа (с 4–5 до 10–11 кДж/м³), но благодаря эндотермическому их характеру, снижают температуру газа в зоне до средних значений 700–800 °С и на его границах – до 500–600 °С.

На участке Г идут реакции конверсии CO , образования метана:



а также процессы термического разложения угля с выделением CO и CO₂. За счет потерь CO и поступления из пласта паров воды теплота сгорания газов снова резко снижается.

Полученное за счет экзогенного характера реакций небольшое количество теплоты не может компенсировать теплотопери в пласт и вмещающие породы, а также расходы на термическое разложение угля, поэтому температура газов и пород на участке Г составляет только 120–150 °С.

На участке Д температура еще более снижается – до 100–110 °С в связи с теплотоперями в окружающий массив и расходами на сушку угля и газов.

Основные факторы, влияющие на эффективность подземной газификации угля, могут быть объединены в следующие группы: горно-геологические условия залегания месторождения; количество воды, вовлеченное в процесс, минеральный состав угля; параметры дутья; сетка и расположение скважин.

Горно-геологические условия (мощность пласта, глубина его залегания, тектоническая нарушенность пласта и вмещающих пород), воздействуя через ограничения по техническим возможностям или определяя экономические результаты ПГУ, оказывает существенное влияние на применение этого метода.

Повышение мощности пласта приводит к снижению теплотоперь в окружающую среду, уменьшению удельного водопритока и, в конечном счете, к росту теплоты сгорания газа и КПД процесса ПГУ. Однако удельный выход газа снижается, по-видимому, за счет полноты отработки пласта по мощности. Так, по данным эксплуатации пластов Южно-Абинской станции:

Мощность пласта, м	2	9
Низшая теплота сгорания газа, МДж/м ³	2,8–3,4	4,2–4,9
ПД процесса ПГУ	42–50	49–62
Удельный выход газа, м ³ /кг	4,2–4,9	3,2–3,9

Малая глубина залегания угля может привести к значительным утечкам газа через налегающие породы, а большая глубина делает этот метод неконкурентоспособным по капиталовложениям на бурение скважин.

Наличие сбросов, сдвигов, тектонических нарушений, сложная гипсометрия пластов затрудняет создание реакционного канала и управление очагом горения.

Количество воды, вовлеченной в процесс ПГУ, складывается из естественной влаги угля, водопритоков к разрабатываемому участку, воды, содержащейся в дутье и образующейся при сгорании углерода, водорода, метана и конверсии СО. Суммарная влажность оказывает существенное влияние на эффективность процесса, так как по потерям теплоты на испарение воды определяют интенсивность процесса газификации, а по содержанию водяных паров в получаемом газе – его теплоту сгорания. Малое содержание воды в угле и отсутствие водопритоков могут создавать дефицит влаги, что будет тормозить процесс газификации, в частности уменьшать образование СО при реакциях восстановления. Большое количество воды уменьшает скорость выгазовывания угольного пласта и теплосодержание газа за счет снижения содержания СО и увеличения влажности (рис. 6.8). Следовательно, количество воды, вовлеченное в процесс подземной газификации угля, должно оптимизироваться, а в конкретных условиях строго регулироваться.

Основные мероприятия по управлению количеством воды, участвующей в процессе ПГУ, сводятся к предварительному осушению месторождения дренажными скважинами и выработками, увеличению давления подаваемого воздуха для вытеснения (отжима) влаги из огневого забоя и реакционного канала, повышению содержания кислорода в дутье и увеличению количества подаваемого воздуха.

Минеральный состав угля, главным образом зольность, определяет теплоту его сгорания, химический состав и удельный выход газа. Количество и свойства золы характеризуют проницаемость среды, фильтрующей к поверхности угля дутьё и образовавшиеся газы. Повышение зольности однозначно приводит к ухудшению качества получаемого газа и показателей ПГУ.

К основным факторам, определяющим эффективность подземной газификации угля, относятся параметры дутья: химический состав, интенсивность подачи, давление нагнетания.

Обогащение дутья кислородом повышает температуру в зоне горения, расширяет ее границы и увеличивает теплоту сгорания газа. При подаче дутья с содержанием кислорода в 2 раза выше атмосферного количество CO и H_2 в получаемом газе увеличивается в 1,5–2 раза.

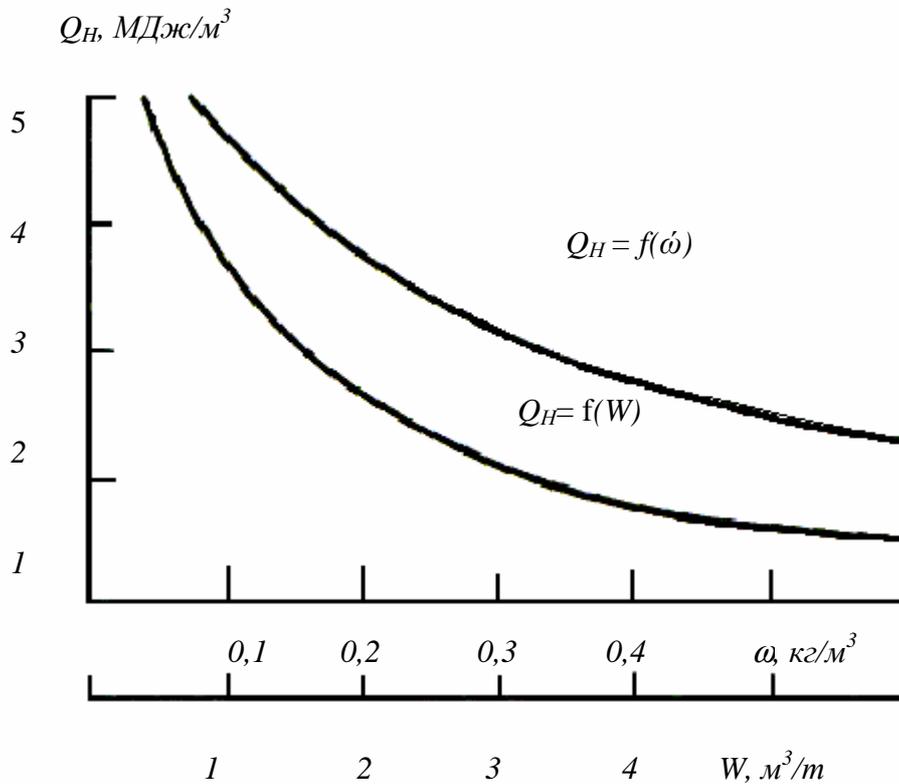


Рис. 6.8. Расчетная зависимость нижней теплоты сгорания газа Q_H от его влагосодержания ω и удельного водопритока к пласту W

Добавление 150–200 г/м³ водяного пара к воздушному дутью (на осушенных месторождениях) интенсифицирует реакции восстановления и повышает выход CO , H_2 и CH_4 . Еще более благоприятное воздействие оказывает совместное использование обогащения кислородом и добавки пара – парокислородное дутьё.

При повышении расхода воздуха (интенсивности подачи дутья) увеличиваются количество кислорода, вступающего в реакции окисления, и скорость его притока к поверхности угля, а также обеспечивается турбулентное течение газов в канале газификации. До определенного предела это повышает эффективность ПГУ, однако при слишком большом расходе воздуха резко увеличивается выход CO_2 и, следовательно, снижается теплосодержание газа (рис. 6.9). Таким образом, при малом

расходе воздуха процесс горения затухает, а при большом – уголь сгорает до CO_2 .

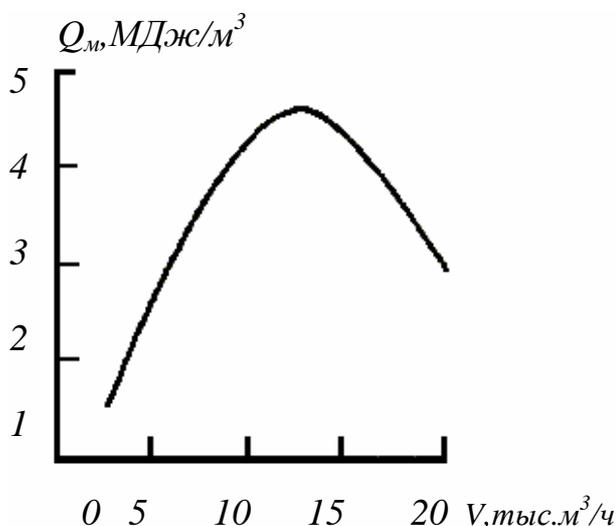


Рис. 6.9. Зависимость нижней теплоты сгорания газа Q от подачи дутья V на Южно-Абинской станции ПГУ

Таблица 6.1

Влияние химического состава дутья на нижнюю теплоту сгорания газов

Станция ПГУ (содержание O_2 , %)	Теплота сгорания газов, МДж/м³
<u>Воздушное дутьё (21)</u>	
Лисичанская	3,1
Подмосковная	3,6
Южно-Абинская	4,6
<u>Кислородное дутьё</u>	
Лисичанская (67)	5,3
Подмосковная (65)	7,3
<u>Паровоздушное дутьё</u>	
Южно-Абинская	6,3
<u>Парокислородное дутьё</u>	
Подмосковная	6,8

При сохранении дутьевого режима увеличение расстояния между скважинами приводит к снижению качества газа. Так, на Подмосковной станции ПГУ при расстоянии 25, 50 и 75 м нижняя теплота сгорания газа составила 4,3; 3,6 и 3,1 МДж/м³. Для противодействия этому явле-

нию необходимо увеличить подачу воздуха или повысить содержание в нем кислорода. Определение сетки скважин требует оптимизации соотношения затрат на их бурение и расходов на дутье.

Технологическая последовательность выполняемых работ состоит во вскрытии пласта скважинами или капитальными выработками, осушении залежи, повышении проницаемости угля, подготовке каналов газификации, образовании и управлении огневым забоем.

При скважинной технологии угольные пласты обрабатывают отдельными (рис. 6.10, *а*) и взаимодействующими (рис. 6.10, *б*) вертикальными (или наклонными) скважинами. Вторая схема газификации применяется на пологих, наклонных и крутых пластах. В зависимости от проницаемости угля выделяют две группы: фильтрационную и с газификацией в канале. Первая характеризуется образованием каналов газификации фильтрационной сбойкой скважин прожигом в угольном пласте. Для этого и остальных способов создания каналов газификации используют противоточную схему, когда очаг горения перемещается навстречу потоку окислителя (дутья), или прямоточную, когда очаг и воздух движутся в одном направлении. Прямоточная схема характерна для первичного розжига пласта, который осуществляется с помощью жидкого высококалорийного топлива, газовых горелок, электронагревателей, пирофорных материалов и др. В связи с ограниченным распространением угольных пластов с высокой проницаемостью подземная газификация угля с фильтрацией в ненарушенном массиве применяется редко.

Гидравлический разрыв угольного пласта обеспечивает широкий фронт работ как по падению, так и по простиранию залежи. Главным недостатком этого способа является трудность управления параметрами и ориентацией трещин гидроразрыва.

Электросбойка производится с помощью электродов, подведённых к пласту через скважины. При включении тока высокого напряжения уголь прогревается, высушивается и разлагается до образования кокса, газопроницаемость которого во много раз выше. В дальнейшем такой коксовый канал расширяется огненной проработкой. Этот способ применим на дренированных и малообводнённых угольных пластах сравнительно неглубокого залегания.

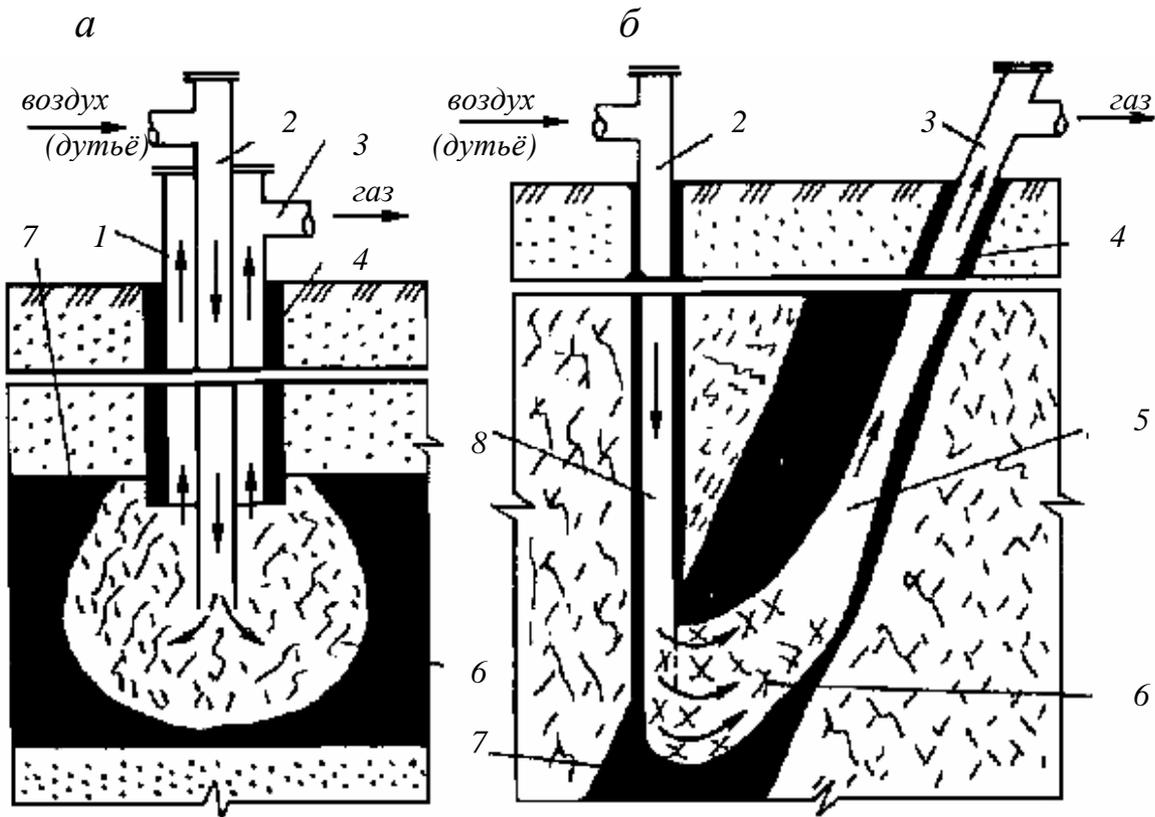


Рис. 6.10. Схемы подземной бесшахтной (скважинной) газификации угля отдельными скважинами (а) и взаимодействующими скважинами на крутом падении (б): 1 – обсадная колонна; 2 – колонна для подачи воздуха (дутьевая); 3 – колонна для выдачи газа; 4 – затрубная цементация; 5 – канал газификации; 6 – выгазованное пространство; 7 – угольный пласт; 8 – вертикальная дутьевая скважина

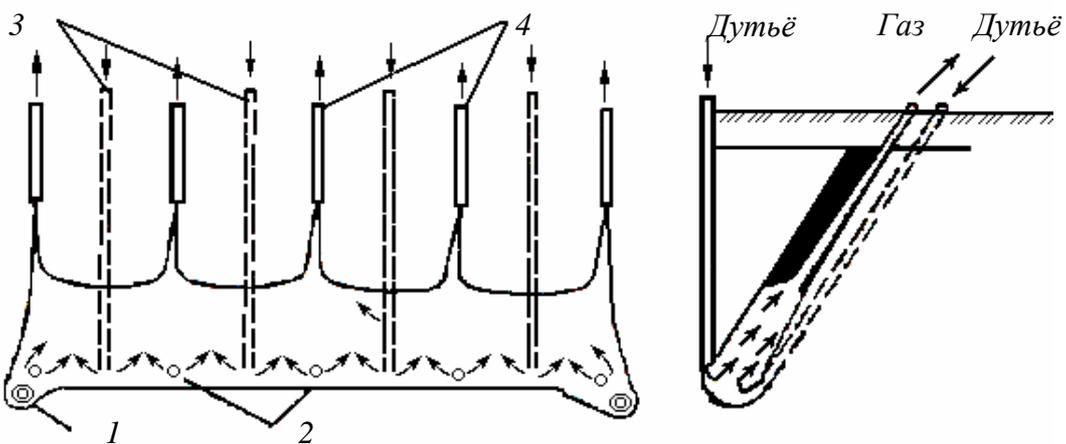


Рис. 6.11. Принципиальная схема газогенератора на наклонных угольных пластах: 1 – вертикальные дутьевые скважины; 2 – водоотливные скважины; 3 – наклонные дутьевые скважины; 4 – наклонные газоотводящие скважины

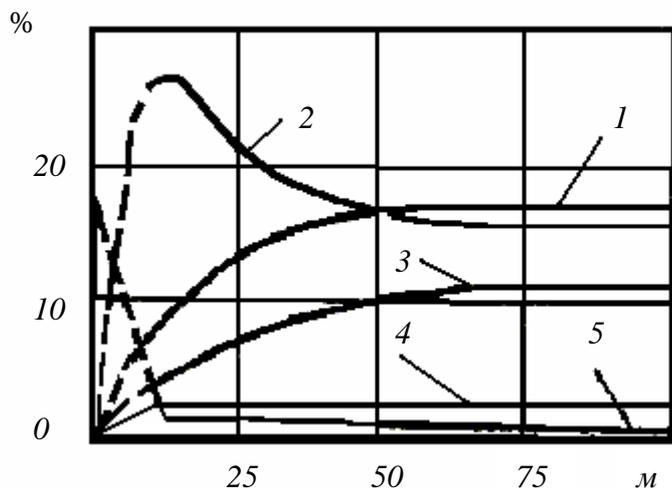


Рис. 6.12. Изменение состава газа по длине канала газификации:
 1 – водород; 2 – окись углерода; 3 – двуокись углерода; 4 – метан;
 5 – кислород

Длину канала газификации рекомендуется принимать не более 75–100 м, так как при повышении длины канала более этих величин снижается качество газа. На рис. 6.12 показано изменение состава газа по длине канала газификации при воздушном дутье.

Подземная газификация угля в Кузбассе производилась на Южно-Абинской станции «Подземгаз». Начиная с 1983 года научно-исследовательские и опытные работы в области, ПГУ, заметно оживились и следует ожидать, что эта прогрессивная технология получит более широкое развитие. Создание эффективной технологии ПГУ позволит вовлечь в топливно-энергетический баланс Кузбасса огромные запасы углей, сосредоточенных в некондиционных участках, а также залегающих в сложных горно-геологических условиях.

Южно-Абинская станция была введена в эксплуатацию на участке Киселевско-Прокопьевского месторождения в 1955 году и работала до 1995 года. В границах горного отвода станции имелось 23 пласта мощностью 2 м и более с углами падения до 70°. Площадь станции 173 га. Промплощадка станции размещалась на безугольной толще. Основные цехи станции – компрессорный и газогенераторный. В компрессорном цехе было установлено более 10 различных компрессоров, создающих различную степень сжатия воздуха: низкое давление – 0,05–0,07, среднее – 0,2–0,4 и высокое до 3 МПа. Для воздуха разного давления

Технологические операции ПГУ

Технологическая операция	Цель операции	Возможные способы осуществления операции
Вскрытие и подготовка залежи к эксплуатации, розжиг пласта	Обеспечение рациональных условий отработки залежи	Бурение и оборудование вертикальных, наклонных и наклонно-горизонтальных скважин. Осушение залежи. Подготовка каналов газификации путём фильтрационной сбойки, гидроразрыва, электро-сбойки. Рыхление залежи взрывом. Использование для розжига горючих веществ, электронагревателей, газовых горелок, пирофорных материалов
Подготовка и подача в залежь газифицирующих агентов	Обеспечение необходимого состава газа ПГУ и автотермичности процесса	Использование воздуха, производство кислорода и смешивание его с водяным паром, воздухом, углекислым газом; закачка газообразной смеси в добычные скважины.
Управление процессом подземной газификации	Обеспечение качества и стабильного состава газа ПГУ, максимальной степени выгазовывания угля, герметичности кровли пласта	Изменение состава газифицирующих агентов, их расхода, точки подачи агентов и отбора продуктов газификации, изменение давления в газогенераторе, применение физических полей, управление горным давлением.
Транспортирование газа ПГУ и его подготовка к переработке	Обеспечение подачи кондиционного газа на технологическую переработку или энергетическим потребителям	Осушение газа, охлаждение в градирнях, удаление пыли на электрофилтрах, очистка от фенолов путём промывки, удаление паров смолы. Использование для транспортирования газа избыточного давления нагнетания или применения дополнительного компрессорного оборудования

имелись отдельные линии воздухопроводов, по которым он подавался в газогенераторы. Станция имела буровой и монтажный цехи.

На Южно-Абинской станции применялся нагнетательный способ подземной генерации газа, который заключается в подаче воздуха, кислорода и других реагентов по системе воздухоподающих скважин диаметром 150 мм в огневой забой и выдаче горючего газа по газоотводящим скважинам.

Рис. 6.13. Технологическая схема подземной газификации угля:

1 – насосная станция условно-чистой воды; 2 – воздухоподающая скважина; 3 – газоотводящая скважина; 4 – газоотводящий трубопровод; 5 – насосная станция первичного охлаждения воды; 6 – скрубберы; 7 – трубопровод подачи газа к потребителю; 8 – котельная; 9 – насосная скрубберного цикла; 10 – компрессорная низкого давления; 11 – компрессорная среднего давления; 12 – компрессорная высокого давления; 13 – воздухопровод высокого давления; 14 – воздухопровод низкого давления; 15 – воздухопровод среднего давления.

Подготовка к генерации газа производилась следующим способом (рис. 6.13). Проходились воздухоподающие скважины в породах кровли пласта и обсаживались трубами. Затем у почвы пласта в створе с подающими скважинами проходили газоотводящие скважины. Воздухоподающая и газоотводящая скважины соединяются в зоне розжига пожара каналом газификации путем гидроразрыва (давление воды до 15 МПа). Затем в этот канал подается сжатый воздух высокого давления (3 МПа) с раскаленным коксом. Таким образом, образуется подземный газогенератор состоящий из 10–15 пар скважин.

Расстояние между парами скважин 10–20 м. Все пары скважин соединялись по простиранию пласта каналом газификации путем подачи сжатого воздуха под давлением до 10,4 МПа. Для поддержания процесса горения по воздухоподающим скважинам подается сжатый воздух под давлением до 0,07 МПа. Температура газа в устье газоотводящей скважины составляет 150–200 °С.

Продукты подземной газификации сначала попадают в скрубберы, где орошаются водой и охлаждаются до 20–30 °С. Одновременно с охлаждением газа из него отделяются шлам, смолы, частично CO_2 . Охлажденный и очищенный газ по системе трубопроводов подавался к по-

требителю. Вода, используемая для охлаждения и очистки газа, проходила систему очистки и использовалась повторно.

Подземный газогенератор на Южно-Абинской станции состоял из 10–16 пар скважин, размер по простиранию достигал 200 м, глубина заложения 130–300 м. Подготовленные запасы по газогенераторам в зависимости от мощности пласта и глубины заложения составляли от 150 до 400 тыс. т.

Состав и количество получаемого газа зависят от многих факторов и, прежде всего, от строения и мощности пласта, глубины залегания, строения вмещающих пород и т. д.

Теплота сгорания газа колебалась в пределах 3350–4605 МДж/кг. После прекращения подачи воздуха в газогенератор в связи с его отработкой, из него в течение 25–30 дней получали товарный газ с содержанием водорода 45–55 %. Это объясняется разложением подземных вод, поступающих в перегретую зону газогенератора.

На отработанных участках Южно-Абинской станции резких провалов на поверхности не наблюдается.

Проектная мощность станции составляла 500 млн м³ газа в год. Фактическая производительность за весь период эксплуатации была несколько меньшей.

Себестоимость 1000 м³ газа также существенно менялась от 2,34 рублей в 1970 году до 8,50 рублей в 1988 году.

Вблизи станции «Подземгаз» нет крупных потребителей газа, которые могли бы использовать его равномерно в течение года. Поэтому выработка газа зависела от уровня сезонного потребления. В зимнее время выработка газа изменялась в пределах 0,9–2,0, а в летнее 0,3–0,4 млн м³ в сутки. Газ использовался на 14 промышленных предприятиях Киселевска, однако объёмы потребления были нестабильны, и это в целом мешало работе станции.

Действующие в настоящее время «Временные критерии пригодности угольных месторождений для подземной газификации угля» (1986 г.) основывались на традиционной технологии подземной газификации угля (ПГУ), освоённой на опытно-промышленных предприятиях (Подмосковная, Шатская, Ангренская станции «Подземгаз» на бурых углях, Лисичанская и Южно-Абинская станции «Подземгаз» на каменных углях).

Сегодня технология подземной газификации угля претерпевает заметные изменения, существенным образом влияющие на оценку при-

годности того или иного месторождения для подземной газификации угольного пласта. За прошедшие годы в нашей стране и за рубежом, прежде всего в США и Западной Европе, созданы и отработаны новые элементы технологии, существенно расширяющие сырьевую базу ПГУ. По американским данным сырьевая база извлечения угля с помощью подземной газификации увеличивается в 4 раза.

Во многих странах мира (США, Великобритания, Франция, Бельгия, ФРГ) ведутся работы по созданию опытных станций ПГУ. Опыты в области подземной газификации угля проводились также в Чехии, Словакии, Польше и Италии.

Подземная газификация наиболее пригодна для разработки глубоко залегающих (до 1500 м) угольных пластов, и большинство ведущихся исследований в этой области ставит своей целью создание технологии подземной газификации угольных пластов на глубине 1500 м и более. За рубежом считают, что при глубине залегания пластов до 300 м ПГУ затруднительна ввиду возможного наличия неплотных зон в породах кровли, а главное, из-за опасности загрязнения подземных вод продуктами сгорания угля.

На первых станциях ПГУ на пластах малой мощности в основном были получены низкокалорийные газы при использовании в качестве дутья воздуха, обогащённого кислородом.

Переход к подземной газификации глубоко залегающих пластов с подачей дутья под давлением до 5 МПа открывает перед этой технологией новые перспективы.

В настоящее время на практике используют три основных технологических варианта ПГУ:

- производство низкокалорийного газа (для снабжения электростанций) при применении в качестве дутья смеси воздуха с водяным паром;
- производство газа со средней теплотой сгорания используемого как сырьё для химических предприятий, при применении в качестве дутья смеси кислорода с водяным паром;
- производство газа, способного заменять природный газ (обогащение получаемого газа метаном достигается за счёт подачи под высоким давлением смеси газов с высоким содержанием водорода).

В настоящее время уже нет сомнений в том, что подземная газификация является одним из перспективных путей производства синтетического топлива (синтез – газа, метанола).

Корпорация «Бритиш коул» (Великобритания) подготовила проект эксперимента по ПГУ стоимостью 22,5 млн дол. с целью определения возможности подземной газификации глубоко залегающих угольных пластов. Эксперимент будет проводиться на угольном пласте мощностью 1,9 м на глубине 600 м.

Компания «Пибоди коул» и Технологический центр по энергетике Министерства энергетики США разработали программу экспериментов по подземной газификации каменного угля на угленосных участках в штате Иллинойс стоимостью в 24 млн дол.

В течение последних лет Министерство энергетики США провело 14 экспериментов в области подземной газификации угля. Нефтяные и газовые компании, а также компании по производству электроэнергии вложили миллионы долларов в производство данной технологии.

Согласно некоторым прогнозам, в ближайшие годы в США будут введены в эксплуатацию первые промышленные участки ПГУ. Однако в целом оценки перспектив осуществления ПГУ в промышленных масштабах всё ещё разноречивы. Так, некоторые специалисты считают, что только в случае резкого ухудшения положения в области газо-и нефтеснабжения этот способ разработки угольных месторождений может оказаться жизнеспособным.

Во всё больших объёмах ведутся работы по созданию и промышленному освоению специальных установок на дневной поверхности для газификации добытого угля.

Компания «Синтезе-газ-анлаге Рур» (ФРГ) строит в Оберхаузен-Хольтене первую в стране промышленную установку второго поколения по газификации каменного угля. Общие капиталовложения на сооружение этой установки составляют около 220 млн евро.

Проект предусматривает газификацию каменного угля по способу американской компании «Тексако дивелопмент». Для испытания этого способа построена опытная установка по газификации угля производительностью 15 тыс. м³/ч синтез-газа, которая работает с 1978 года. Здесь же испытано и специально созданное оборудование. Полученный опыт был использован при конструировании оборудования для новой установки, которая рассчитана на поступление угля примерно 30 т/ч, что обеспечит производство 50 тыс. м³/ч синтез-газа. Газификация обогащённого угля производится с кислородным дутьём при температуре 1500 °С и давлении 4 МПа.

В Оберхаузен-Хольтене работает установка по газификации угля «Синтезе-газ-анлаге Рур». Установка предназначена для переработки 250 тыс. т угля в год. Она производит 320 млн. м³ синтетического газа и 140 млн м³ водорода. Капитальные затраты на сооружение установки составили около 220 млн марок.

Нидерландская компания по производству электроэнергии объявила о строительстве крупнейшей в мире ТЭС по технологии газификации угля мощностью 250 тыс. кВт. Для этой ТЭС выбрана технология газификации угля, разработанная компанией «Шелл», чистая с точки зрения охраны окружающей среды, экономичная и в сочетании с модернизированными газовыми турбинами наиболее приемлемая для расширяющегося во всём мире строительства ТЭС, работающих на угле.

Подобные примеры работ многочисленны, работы ведутся во многих странах мира, что говорит о безусловной перспективности метода.

Новые технологические элементы, обуславливающие расширение сырьевой базы подземной газификации угольных пластов:

1. Газификация угля в длинных буровых каналах по угольному пласту с постепенным переносом точки подвода окислителя по длине дутьевой скважины, позволяющая не только интенсифицировать тепло массообмена между окислителем и реакционной поверхностью угольного пласта и повысить выход горючих компонентов в образующемся газе (СО₂, Н₂, СН₄), но и снизить удельные затраты на подготовку угля к газификации, повысить стабильность процесса ПГУ.

2. Бурение длинных каналов (скважин) по угольному пласту, опробованное с помощью электрических и винтовых забойных двигателей. Системы слежения за положением забойного двигателя в угольном пласте позволяют не только добиться высокой скорости бурения, но и сократить количество выходов во вмещающие породы.

3. Газификация угля на дутье, обогащенном кислородом и паром, а также на чистом кислороде (95 % О₂) с присадкой перегретого пара, обуславливающая возможность получение сырого газа ПГУ с теплотой сгорания 8–10 МДж/м³.

4. Утилизация тепла извлекаемого газа ПГУ, не только повышающая коэффициент полезного действия процесса газификации, но и позволяющая возратить большую часть ранее теряемого физического тепла в зону газификации в виде перегретого пара и нагретого дутья.

5. Возможность поддержания в подземном газогенераторе повышенного давления с увеличением глубины газифицируемого угольного пласта. Последнее не только благоприпятствует повышению в газе ПГУ концентрации метана, но и позволяет снизить приток подземных вод в зоны газификации.

6. Возможность в отдельных случаях (с целью снижения утечек газа и дутья из подземного газогенератора) осуществления процесса ПГУ при пониженном давлении. Последнее осуществляется с помощью отсоса газа ПГУ специальными тяговыми устройствами, устанавливаемыми на газоотводящих скважинах. Такая система подземной газификации угля, заключающаяся в нагнетании дутья в одни скважины и отсосе образовавшегося газа из других скважин, особенно желательна в условиях близости соседних отработанных участков, а также при повышенной проницаемости пород непосредственной кровли угольного пласта.

7. Низкая (10–15 МВт) мощность газовых турбин, ограничивающих тепловую мощность предприятия ПГУ. Если близлежащему потребителю достаточно такой тепловой мощности, то требуемые запасы для ПГУ могут быть весьма ограниченными.

8. Возможность исполнения наземного энергохимического комплекса современного предприятия ПГУ различным образом, определяемой энергетической, экологической и социальной инфраструктурой региона. Потребителем энергоносителя предприятия ПГУ могут быть электростанция, местная промышленность, а также специальное химическое предприятие по синтезу метана или жидкого топлива на базе основных компонентов газов ПГУ (CO , H_2). При этом транспортирование таких ценных энергоносителей, как электричество или метан, возможно осуществлять на большие расстояния. Согласно действующей редакции «Временных критериев пригодности» (1986 г.) к основным факторам, определяющим пригодность и целесообразность разработки угольных месторождений методом ПГУ относятся: запасы и марка угля, мощность и строение угольного пласта, зольность угля, литология пород кровли и почвы угольного пласта, глубина и угол залегания пласта, тектонические нарушения участка газификации, гидрогеологические условия, наличие смежных горнодобывающих предприятий.

С учетом требуемой тепловой мощности предприятия ПГУ запасы угля должны обеспечивать его хотя бы 30-летнюю эксплуатацию. В отличие от требований предыдущих «Временных критериев» достаточ-

ные запасы угля существенно ниже ранее определенных, для каменных – 10 млн т и бурых углей – 30 млн т. Предприятия ПГУ могут отрабатывать забалансовые запасы, а также запасы угля, заключенные в отдельных линзах. Возможна отработка запасов угля, оставленных в шахтах, завершивших свою эксплуатацию. Подземной газификации могут быть подвергнуты любые марки углей, наиболее благоприятны угли с существенным выходом летучих (17–35 %) и ограниченным содержанием балласта (зола и влаги). Опыт подземной газификации тощих углей и антрацитов пока является негативным, поэтому их нецелесообразно включать в запасы, пригодные для ПГУ.

С учетом возможности осуществления ПГУ на кислородном и обогащенном кислородом дутье допустимая минимальная мощность газифицируемого пласта составляет: для каменных углей – 0,7 м, для бурых углей – 1,5 м. При этом удельный водоприток в зоны газификации на воздушном дутье не должен превышать $1,0 \text{ м}^3/\text{т}$. С увеличенными водопритоками можно бороться с помощью предварительного осушения газифицируемого участка и повышения концентрации кислорода в дутье. Существенное влияние на величину теплоты сгорания получаемого газа и степень выгазовывания угольного пласта оказывает структура последнего, т. е. количество и местоположение породных прослоев в нем. Согласно имеющимся данным газификация нескольких пачек угля, разделенных породными прослоями, зависит от возможности прогрева и разрушения прослоя. Исходя из этого, совместная газификация нескольких пачек угля возможна при отношении мощности нижележащей пачки угля не более 0,5 м.

С увеличением зольности угля при прочих равных условиях снижается теплота сгорания получаемого газа.

Уменьшение этого негативного влияния возможно путем увеличения концентрации кислорода в дутье и путем снижения удельных водопритоков в зоны газификации. Для ПГУ пригодны угольные пласты с зольностью до 50 % (на сухую массу).

Литология вмещающих пород (прежде всего кровли угольного пласта) оказывает заметное влияние на выбор способов сбойки скважин и последующей газификации угольного пласта. Наиболее благоприятны условия, когда в непосредственной кровле и почве угольного пласта залегают породы (глины, аргиллиты, алевролиты и др.), газопроницаемость которых существенно (в 10 и более раз) меньше проницаемости угольного пласта.

Нижняя граница глубины разработки угольного пласта методом ПГУ определяется возможностями бурения эксплуатационных скважин. Для современного скоростного направленного бурения скважин по пласту угля нижней границей можно считать 1200–1500 м. Верхняя граница выгазовывания угольного пласта обусловлена возможностями нарушения земной поверхности в виде провалов и трещин: для пологих и наклонных пластов эта безопасная граница должна быть не меньше 15 h , для крутых – не меньше 10 h (h – мощность пласта угля). Освоенный угол залегания газифицируемых пластов 0–60°.

Тектонические нарушения участка газификации вызывают необходимость дополнительной его разведки и осложняют прежде всего бурение направленных скважин по угольному пласту. Границы участков газификации могут быть определены только после детальной разведки и в ходе эксплуатационного бурения. Дизъюнктивные нарушения по падению и простиранию угольного пласта могут являться границей подземного газогенератора.

При традиционной технологии ПГУ между предприятием «Подземгаз» и соседней шахтой должны быть оставлены предохранительные целики. Величина их зависит от литологии пород кровли и почвы. Величина таких целиков, которые препятствуют проникновению газа в соседние выработки шахты и других химических продуктов ПГУ, равна 200–500 м. Переход к новой технологии ПГУ, одним из возможных элементов которой является оборудование газоотводящих скважин специальными дымососами, позволяет существенно сократить предохранительные целики. С использованием этого элемента новой технологии становится реальной отработка оставленных запасов угля шахты методом подземной газификации угля.

Известно, что одним из принципиальных элементов концепции реструктуризации угольной отрасли России является необходимость закрытия нерентабельных угледобывающих предприятий. Так, только в Кузбассе уже закрыто более 30 шахт. В то же время предварительное изучение структуры запасов углей, оставляемых при этом в недрах Кузбасса, позволяет говорить об их значительном количестве. Оставляемые запасы угля почти на каждой закрываемой шахте измеряются десятками миллионов тонн. Можно согласиться с тем, что оставляемый в недрах уголь нельзя экономически рентабельно извлечь посредством использования традиционных технологий. В этой ситуации особенно актуальным становится поиск технологий, дающих возможность рента-

бельно отработать эти запасы. Названные запасы угля в большинстве случаев возможно успешно доработать с помощью технологии ПГУ.

Второе направление – использование газа ПГУ в газотурбинных установках для получения электроэнергии. Здесь не требуется повышенная теплотворная способность газового сырья, так как газотурбинная установка имеет теплотворную способность 3.8–4.2 МДж/м³. Реализация этого направления применения газа ПГУ в настоящее время отсутствует. Расчетный состав газа подземной газификации угля при использовании в технологии газификации воздушного дутья следующий:

CO (10–14 %), H₂ (12–16 %), CO₂ (12–15,3 %), O₂ (0,2 %),

CH₄ (2,0–4,0 %), N₂ (55–60 %), H₂S (0,01–0,06%).

Ожидаемый состав получаемого газа при использовании в технологии газификации паро-кислородного дутья имеет вид:

CO (35–35 %), H₂ (45–50 %), CH₄ (5–8 %), O₂ (0,3 %), N₂ (4–6 %).

Весьма важным представляется и социальный аспект осуществления доработки оставшихся в недрах запасов углей методом ПГУ. При строительстве и эксплуатации участка подземной газификации будут создаваться новые рабочие места.

Регионом, в котором экологическая ситуация достигла особой остроты, в полной мере является Кузнецкий бассейн.

Меньшее экологическое воздействие на окружающую среду подземной газификации угля по сравнению с традиционными технологиями добычи угля является одним из основных вопросов стратегической их оценки. На основании имеющихся данных, полученных в результате специально выполненных исследований при подземной газификации угля на Южно-Абинской станции «Подземгаз» в Кузбассе, даётся оценка степени воздействия ПГУ на подземные воды. Основная доля вредных веществ, образующихся при ПГУ, выносится вместе с газом на земную поверхность и образует газовый конденсат. В нем содержится обычно 1000–2000 мг/л фенолов, 4–25 мг/л цианидов, 2000 мг/л растворенного аммиака, смолы и др. Масштабы и динамика загрязнения подземных вод изучались на специально пробуренной режимной сети наблюдательных скважин, охватывающей действующие и отработанные

газогенераторы горного отвода Южно-Абинской станции «Подземгаз». Было установлено, что до начала газификации подземные воды, заключенные в трещиноватых породах горного отвода станции «Подземгаз», имели минерализацию 400–600 мг/л, реакция вод щелочная, РН (8,1 – 8,6). По химическому составу воды являлись гидрокарбонатно-кальциевыми и магниевыми. В процессе ПГУ подземные воды претерпевают изменения, происходит увеличение минерализации подземных вод, в основном за счёт гидрокарбосульфатов. При этом содержание сульфатов не превышает предельно допустимой концентрации для питьевого водоснабжения. В процессе ПГУ происходит нагрев подземных вод температура их в большинстве случаев колеблется от 15–20 до 55–60 °С. Загрязнение на площади отработанных газогенераторов изучалось на основании химических анализов подземных вод по 19 скважинам, 4 из которых расположены по контуру, а 15 – на площади газификации угольных пластов «II-Внутренний», «VIII-Внутренний» и «Горелый». Минерализация подземных вод на отработанных газогенераторах по большинству проб колеблется от 465 до 1183 мг/г. Вероятно, на площади отработанных газогенераторов происходит самоочистка подземных вод, т. е. после начала откачки вод повышенная концентрация компонентов (из-за десорбции), затем постепенно снижается. Наиболее опасными источниками загрязнения подземных вод являются поверхностные отстойники конденсата. Их необходимо заменить емкостями с бетонированными стенками. Разрабатываемая новая технология ПГУ имеет некоторые преимущества по сравнению с традиционной в части возможного загрязнения подземных вод. Во-первых, при контролируемом переносе точки подвода дутья обеспечивается минимальный контакт горячих продуктов газификации с подземными водами. Во - вторых, замена контактного охлаждения газа бесконтактным снижает количество газового конденсата, наиболее насыщенного вредными компонентами, в 4–5 раз.

На протяжении последних лет ПГУ остается результатом дискуссий на международных форумах, а также экспериментальных исследований, как в нашей стране, так и за рубежом.

При анализе 250 угольных объектов в Центральной Сибири по пригодности для ПГУ можно выделить две группы:

- пригодные для ПГУ – 2 места: Татарское и Урало-Ключевское месторождение;

- в перспективе пригодные для ПГУ – 47: в Канско-Ачинском бассейне – 13; в Минусинском бассейне – 7; в Тувинской республике – 3; в Тунгусском бассейне – 7 и в Иркутском бассейне – 21.

Общие геологические запасы по этим группам составляют 158 млрд т угля.

ПГУ является единственным способом безлюдной добычи угля путем превращения твердого топлива в газообразный энергоноситель непосредственно на месте залегания угольного пласта.

Выявлены некоторые направления исследований в области ПГУ. К основным направлениям следует отнести оценку запасов под разработку методом ПГУ:

- поиск путей повышения энергетического и химического К.П.Д. процесса ПГУ;
- разработку методики технико-экономической оценки комплексного использования газов ПГУ в энергетике и химической промышленности;
- получения газа заданного состава, удовлетворяющего требованиям переработки его на химическую продукцию;
- разработку методов очистки и обогащения газов для обеспечения более экономного его использования и контроля состава газов ПГУ.

6.7. Добыча полезных ископаемых из подземных минерализованных вод

Гидроминеральные ресурсы природных и техногенных минерализованных вод, из которых технологически возможно и экономически целесообразно, а иногда и экологически необходимо извлекать полезные компоненты, называют «жидкая руда».

Обычная классификация гидроминерального сырья предусматривает деление на подземные, поверхностные природные и техногенные воды.

Первые обычно приурочены к вулканическим и горноскладчатым областям, артезианским бассейнам и межкристаллическим и погребенным рассолам.

Воды горноскладчатых областей обычно бывают азотно-углекислые и азотные и содержат редкие элементы: литий, рубидий, цезий, а также бор, мышьяк в количествах соответственно 100, 5, 20, 1000 и 100 мг/л.

Из этих вод, например в Италии (парогидротермы Тосканы), добывается ежегодно до 15 тыс. т различных веществ, в том числе 4,4 тыс. т борной кислоты, 5 тыс. т буры, 620 тонн хлористого аммония.

Рассолы артезианских бассейнов преимущественно относятся к хлоридному типу и характеризуются высоким содержанием йода, брома, лития, цезия, стронция, бора.

Вторые – это морские и озерные рассолы, из них в промышленных условиях извлекают натрий, калий, хлор, магний и бром, соду, бор и другие элементы. Ведутся исследования по извлечению урана, золота и других элементов.

Техногенные воды – это сточные воды нефтепромыслов, шахт, карьеров, рудников и обогатительных фабрик.

В настоящее время нефтяные воды (хлоридного типа) используют для получения брома и йода.

Сточные воды шахт и рудников составляют в год 17 млрд м³ и имеют главным образом сульфатный и хлоридный состав с минерализацией до 200 г/л и содержат самые разнообразные полезные элементы.

Сточные воды гидротермальных установок содержат промышленные концентрации бора, лития, рубидия.

Добыча полезных ископаемых из вод складывается из бурения и оборудования добычных скважин, откачки вод, технологии извлечения из них полезных компонентов, сброса и захоронения или утилизации отработанных вод.

Успех разработки месторождений гидроминерального сырья определяется физико-геологическими условиями залегания вод и концентрацией полезных компонентов.

Добыча минерализованных вод имеет много общего с нефтедобычей. Месторождения вскрывают системой скважин, оборудованных фонтанной арматурой (при самоизливе) или насосами. Добыча может эффективно вестись с поддержанием пластового давления путем подачи в залежь отработанных вод, что обеспечивает одновременное решение задач интенсификации добычи и сброса отработанной воды.

В переработке добытых вод используют следующие технологические схемы: галургическую схему переработки рассолов с многостадийной упаковкой; схему, использующую осадительные методы, сорбцию, экстракцию и упаривание; схему селективного извлечения микрокомпонентов без извлечения основных минералов. Выбор схемы пере-

работки зависит от минерального состава вод, потребностей в продукции и экологических требований.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки новых технологий переработки гидроминерального сырья, потребность в которых чрезвычайно велика, так как их отсутствие сдерживает освоение гидроминеральных ресурсов страны и не позволяет ликвидировать дефицит производства многих редких элементов.

6.8. Добыча и использование тепла Земли

В последние годы исследуются возможности использования глубинного тепла Земли в качестве дополнительного источника энергии. Эта идея, выдвинутая впервые К.Э. Циолковским в 1897 году, развита в дальнейшем В.А. Обручевым (1920 г.) и Ч. Парсоном (1925 г.). Она положена в основу исследований 60–70-х годов по геотермике, выполненных Ю.Д. Дядькиным, Э.В. Богуславским, учеными Франции и США, Германии.

С конца 1994 года геотермальными водами обеспечиваются 640 квартир в г. Нойштадте-Глеве. Горячую воду добывают с глубины 2 250 м с температурой 100 °С. Из общей мощности построенных ТЭЦ в 9,5 МВт 6,5 МВт производится за счет геотермальных вод.

Внимание к геотермальным месторождениям обусловлено тем, что пригодные для использования их ресурсы составляют 137 трлн т условного топлива, что на порядок превосходит топливные ресурсы мира. Кроме того, опыт использования геотермальных теплоносителей в благоприятных условиях показал, что они в 2–5 раз выгоднее топливных и атомных энергоустановок. Однако доля геотермальной электроэнергии в мировом топливно-энергетическом балансе чрезвычайно мала и составляет около 0,16 %. Хотя практическое использование тепла Земли начато еще 4 тыс. лет назад, а научное изучение – 25 веков тому назад, только в 1828 году в Лардеролло в Италии был сделан первый шаг в геотехнологии – пробурили первую геотермальную скважину. В 1905 году в Италии начала действовать первая геогЭС.

Геотермальная технология – совокупность знаний о способах, средствах и процессах добычи, обработки и доставки потребителям геотермальных теплоносителей, обеспечивающих экономическую эффективность их использования.

Геотермальные ресурсы – часть теплосодержания твердой, жидкой и газообразной фаз земной коры, которая может быть эффективно извлечена из недр и использована при данном уровне развития геотермальной технологии и энергетики.

Геотермальная система – совокупность природных образований, инженерных сооружений, технических средств и обусловленных ими физических и технологических процессов, обеспечивающая добычу из недр, обработку и доставку потребителю кондиционного теплоносителя в условиях данного геотермального месторождения.

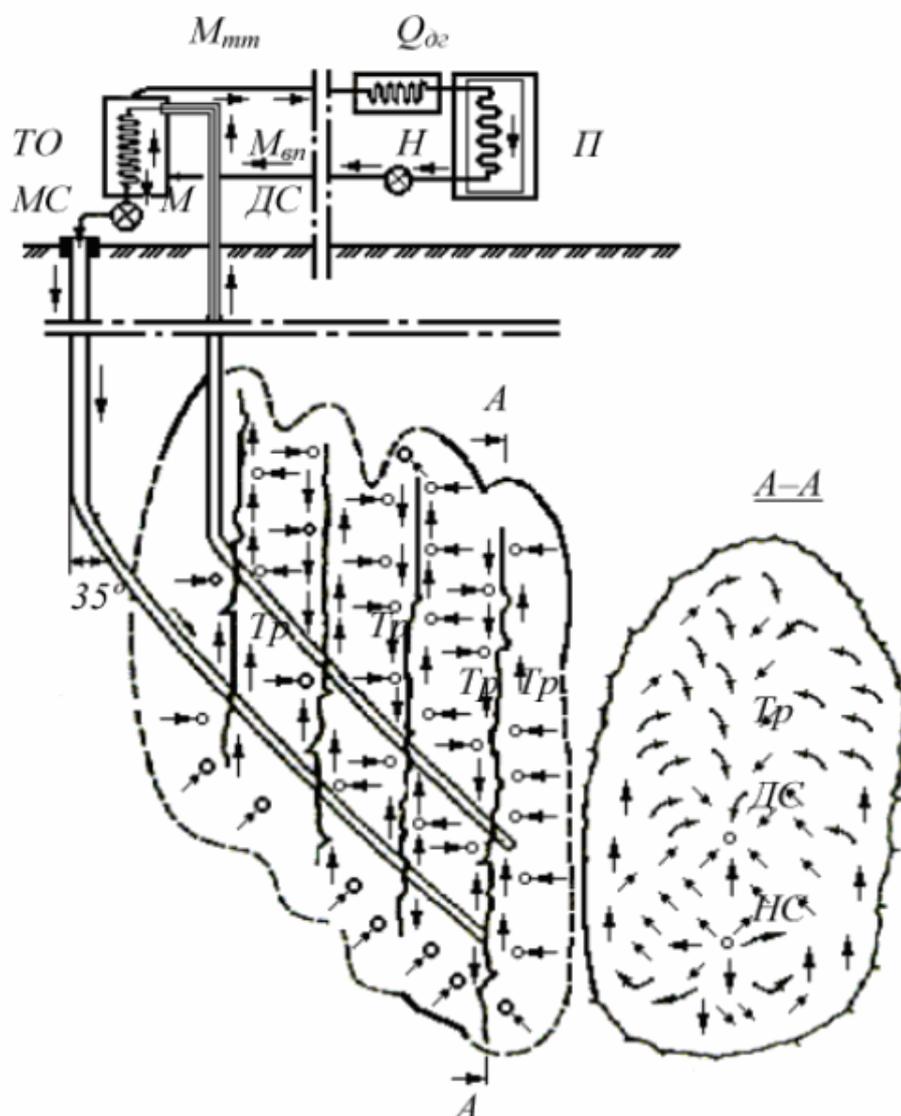


Рис. 6.14. Принципиальная схема геотермальной циркуляционной системы

Принципиальная схема геотермальной циркуляционной системы приведена на рис. 6.14. Основными элементами такой системы являют-

ся: зона теплоотбора с геотермальным коллектором, геотермальные скважины, поверхностный технологический комплекс. В систему входят как минимум две скважины: *НС* – нагнетательная и *ДС* – добычная. Для увеличения площади контакта теплоносителя с породным массивом в последнем формируются трещины гидроразрыва T_p , образующие геотермальный коллектор.

Поверхностный технологический комплекс включает: *H* – циркуляционные насосы, *ТО* – промежуточный теплообменник между контурами первичного и рабочего теплоносителя, M_{mm} – магистральную теплотрассу; $Q_{\partial z}$ – теплообменник для получения дополнительной внешней энергии при догреве теплоносителя; *П* – теплообменный аппарат потребителя; M_{en} – магистральный водопровод.

Зона теплоотбора – это участок массива, примыкающий к геотермальным скважинам, на котором осуществляется дренирование природных и фильтрация нагнетаемых с поверхности теплоносителей и охлаждение твердых горных пород.

Геотермальный коллектор – совокупность естественных или искусственных фильтрационных каналов в зоне теплоотбора, в которых формируется и поступает к добычным геотермальным скважинам поток природного или нагретого в процессе теплообмена с горячими породами геотермального теплоносителя.

Геотермальные скважины делят на:

- параметрические (для изучения геотермических и гидрологических условий региона);
- разведочные (для изучения геотермального месторождения и подсчета запасов);
- эксплуатационные (для вскрытия коллекторов и обеспечения добычи энергии);
- разведочно-эксплуатационные.

Эксплуатационные скважины делят на:

- добычные – для подъема геотермального теплоносителя на поверхность;
- нагнетательные – для закачки в геотермальный коллектор отработанного теплоносителя;
- вспомогательные – для размещения контрольно-измерительной аппаратуры, добычи подземных вод, подземного захоронения отработанных теплоносителей или их вредных компонентов;

- специальные – для создания искусственных коллекторов, противотрифильтрационных экранов и завес, других работ, необходимых для повышения эффективности эксплуатации месторождения.

Технологическая классификация геотермальных систем включает три классификационных признака:

- природно-технологические особенности геотермальных коллекторов;
- способы подъема теплоносителя по добычным скважинам;
- способы кондиционирования, доставки потребителю, последующей утилизации или сброса теплоносителя.

Все системы разработки гидротермальных месторождений можно разделить на две группы: с обособленными и взаимодействующими зонами теплоотбора. Системы разработки с обособленными зонами возмущения гидрогеологического режима и температурного поля в пределах зоны теплоотбора не оказывают влияния на условия извлечения энергии в соседних скважинах, а системы разработки с взаимодействующими зонами теплоотбора предполагают частичное «наложение» соседних зон друг на друга при последовательном или одновременном их формировании.

Несмотря на возрастающий интерес к использованию тепла недр Земли, широкая реализация данного способа имеет место только в уникальных регионах, таких как Исландия и Камчатка.

6.9. Бактериально-химические технологии в горном деле

Бактериально-химические способы (или микробиологическая интенсификация процессов выщелачивания) получили промышленное развитие во второй половине XX века. Еще в XIX веке русский ученый С.Р. Виноградский впервые описал группы бактерий, являющихся преобразователями минеральных веществ. Открытие таких бактерий позволило ускорить в несколько раз процессы выщелачивания меди. Оптимальная температура активной жизнедеятельности этих бактерий 28–30 °С, однако они функционируют в интервале температур 0–40 °С. Ведутся исследования бактериально-химического выщелачивания никеля, кобальта, меди. Прогнозы развития этого направления скважинной технологии довольно оптимистичны.

Есть основания полагать, что биотехнология найдет применение и при разработке угля. Известно, что большинство природных превраще-

ний органических соединений углерода происходит при участии микроорганизмов. Биохимические процессы, происходящие под воздействием микроорганизмов, лежат в основе биотехнологии.

Ископаемый уголь является природным концентратом органических соединений, которые могут участвовать в биохимических процессах под воздействием микроорганизмов с получением «подвижной» массы. Органическая масса угля при этом выполняет двойную роль: во-первых, является средством питания для микроорганизмов, во-вторых, уголь претерпевает химические превращения под воздействием продуктов жизнедеятельности микробов. Оба эти процесса идут одновременно.

Образующиеся под воздействием микробов продукты сами по себе очень активные, проникают по микротрещинам внутрь частиц угля, способствуют его разложению и образованию суспензии. Этот процесс можно регулировать путем подбора соответствующих микроорганизмов. Установлено, что путем воздействия таких суспензий на бурые угли Канско-Ачинского бассейна можно получать заменитель природного гумусного слоя (почвы), который можно использовать для рекультивации поверхности Земли.

Кроме того, эти суспензии являются хорошими стабилизаторами водоугольных смесей при передаче их по трубам.

Однако следует отметить, что биотехнология в горном деле только набирает силу, имеется много нерешенных проблем, требующих усиленных научных исследований.

Контрольные вопросы

- 1. Поясните сущность добычи полезных ископаемых подземным растворением.*
- 2. Дайте определение методу добычи полезных ископаемых подземным растворением (на примере калийной соли).*
- 3. Назовите основные достоинства метода подземного выщелачивания.*
- 4. Покажите на рисунке и поясните схему отработки пластового месторождения выщелачиванием через скважины.*
- 5. Покажите на рисунке и поясните схему подземного выщелачивания с использованием горных выработок.*
- 6. Поясните способ подземной выплавки серы горячей водой, нарисуйте принципиальную схему.*

7. Поясните сущность подземной газификации угля, реакции взаимодействия углерода, кислорода, водорода и метана в канале газификации.

8. Изобразите график изменений температуры процессов и характера химических реакций по длине канала газификации.

9. Изобразите и поясните схему подземной газификации угля взаимодействующими скважинами на крутом падении.

10. Охарактеризуйте опыт подземной газификации угля на Южно-Абинской станции в Кузбассе.

11. Перечислите геотермические методы разработки нефтяных месторождений (по А.Б. Шейнману).

12. Поясните метод скважинной гидродобычи полезных ископаемых.

13. Что такое геотермальные ресурсы Земли и как они используются в настоящее время?

14. Поясните принципиальную схему геотермальной циркуляционной системы.

15. Поясните сущность бактериально-химических технологий в горном деле.

7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ РАЗРАБОТКИ

7.1. Особенности проектирования геотехнологии

Главной задачей проектирования предприятия по добыче полезных ископаемых геотехнологическими способами является определение оптимального сочетания мощности, срока службы, способа вскрытия, системы разработки. Правильный выбор параметров предприятия связан с необходимостью учета всех горно-геологических и зависимых от них технологических и технико-экономических факторов. Для широкого внедрения новых способов необходимо обосновать рациональные параметры технологии, на основе которых возможна разработка проекта эксплуатации месторождения. Задачей проектирования является выбор рациональной системы, при которой запасы будут извлечены с наименьшими потерями и затратами.

Проектирование предприятия является комплексной задачей, при решении которой залежь, добычная скважина, поверхностные сооружения должны рассматриваться как единое целое. Для получения опти-

мального варианта следует рассмотреть ряд вариантов. При проектировании горнодобывающего предприятия рассматриваются горно-геологические и технологические факторы. Кроме этого, необходим выбор критериев оценки принятых решений. От выбора критерия оценки зависит поиск оптимальных решений.

Основные этапы проектирования. Для составления проекта предприятия необходимо:

- получить задание на проектирование;
- получить исходные данные – геологическое описание месторождения полезного ископаемого и вмещающих пород, гидрогеологическую характеристику месторождения, данные технологического опробования полезного ископаемого и запасов, описание географических и климатических условий, данные о наличии ресурсов воды, топлива, рабочей силы;
- выбрать способ вскрытия и систему разработки месторождения, сетку расположения добычных и вспомогательных скважин, очередность бурения и включения в работу новых скважин и участков;
- выбрать основное оборудование для производства рабочих агентов, транспортирования и переработки полученных продуктов, регенерации рабочих агентов, автоматизации и управления производством;
- определить основные технико-экономические показатели будущего предприятия.

7.2. Расчет параметров геотехнологических способов разработки

Работу геотехнологического предприятия оценивают по технологическим (объему добычи из скважины, удельному расходу рабочих агентов, коэффициенту извлечения и др.) и экономическим показателям.

Некоторые параметры по разным причинам являются неизменными и служат исходными данными для расчета, т. е. являются как бы определяющими. К ним относят физико-геологические (глубина залегания рудного тела и его мощность, содержание полезного компонента и др.), а также частично технологические и технические параметры предприятия. Большая же часть остальных определяемых параметров и показателей может изменяться, причем неполнота и ненадежность ин-

формации о физико-геологических условиях протекания процесса, многообразии влияющих факторов, наличие глубоких внутренних связей между ними и взаимообусловленность их, а также нестационарность процесса определяют необходимость особого подхода к обоснованию и выбору параметров производства.

Влияние множества факторов, которые приходится учитывать при определении параметров процессов на этапе проектирования и эксплуатации, часто носит противоречивый характер. Например, при увеличении времени отработки скважин, как правило, увеличивается объем добываемой продукции, снижаются затраты на горноподготовительные работы, однако расходы на производство рабочих агентов (растворителя, теплоносителя, окислителя и т. д.) существенно увеличиваются. То же происходит и при изменении плотности сетки расположения добычных скважин, параметров рабочего агента и т. д.

Таким образом, выбор параметров геотехнологического процесса может быть осуществлен лишь на базе методики, позволяющей получить оптимальный, в том или ином смысле компромиссный вариант технико-экономических показателей. Это возможно, если для оценки различных вариантов установить критерий оптимизации. В настоящее время таким общепринятым показателем является минимум приведенных затрат. Однако сравнение вариантов можно проводить лишь при одинаковых объемах получаемой конечной продукции, что исключает возможность сравнения вариантов с различным коэффициентом извлечения полезного ископаемого из недр, так как конечный объем добычи из конкретного месторождения по сравнительным вариантам будет различен.

7.3. Экологические аспекты геотехнологических методов

Горнодобывающие отрасли промышленности по данным 1990 года ежегодно образуют 75 млн т. опасных отходов, причём прослеживаемые тенденции не предполагают реального снижения подобных показателей. Площадь покрова Земли, загрязнённого тяжёлыми металлами и фтором, достигла 3,6 млн га. Правомерно утверждать, что вредное воздействие человека на природу достигло того предела, после которого природа начинает мстить. Необходимо коренное изменение технологии, с целью исключения вредного воздействия на природу.

Качественно новый этап в развитии горного производства – скважинные способы добычи, более рациональные с точки зрения взаимо-

отношений человека и природы; они существенно уменьшают вредное воздействие на человека и среду по сравнению с традиционными горными способами.

С точки зрения охраны окружающей среды прогрессивность геотехнологических способов 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 способов заключено требование охраны окружающей среды. Добыча через скважины позволяет исключить отвалы, а последующая рекультивация – сохранить пахотные земли. Однако даже коренное изменение технологии добычи не исключает проблемы регулирования качества среды, а лишь изменяет характер и уровень воздействия на окружающую среду. Поэтому остаются вопросы контроля и регулирования качества загрязнения среды.

Вопрос контроля охраны окружающей среды включает прежде всего понятие допустимого уровня воздействия вредных веществ, т. е. предельно допустимой концентрации этих веществ в объектах внешней среды, при воздействии которой не возникают изменения состояния здоровья людей, выходящие за пределы приспособительных физиологических реакций, и нарушения восстановительной способности природной системы.

Проблема регулирования охраны окружающей среды включает вопросы обеспечения требуемого качества водной и воздушной среды, а также рационального использования недр и имеет ряд специфических особенностей, которые определяют подход к выбору метода регулирования.

В социальном аспекте, достоинством геотехнологических методов является резкое уменьшение опасности труда, так как большинство из них исключает присутствие людей под землёй. Также исключаются многие тяжёлые профессиональные заболевания людей.

Контрольные вопросы

- 1. Главная задача и этапы проектирования геотехнологии.*
- 2. Неизменные и определяемые параметры и влияющие факторы при проектировании геотехнологии.*

3. Экологические аспекты разработки полезных ископаемых и перспективы геотехнологии в этом направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное положение дел в горнодобывающей промышленности России, по сравнению с промышленно развитыми странами, нельзя назвать блестящим. Наукоёмкость, высокие технологии – потребность нынешнего дня, и эта тенденция будет усиливаться. Причём, это связано и с экологическими, и ресурсосберегающими вопросами, и эффективностью извлечения, и производительностью труда. Кроме большого объёма капиталовложений, геотехнологическое производство требует создания мощной инфраструктуры для внедрения современных высоких технологий, как уже созданных, так и для вновь создаваемых. Всё это требует большого количества высококвалифицированных специалистов.

В России традиционно никогда не было недостатка в свежих, новых идеях во всех областях знания и производства. Это подтверждается и положением дел в области геотехнологии – очень многие идеи родились у нас. Однако также традиционно, что большие проблемы возникают с внедрением всего нового, прогрессивного на производстве. Хотелось бы надеяться на то, что данная проблема будет решена, и данное учебное пособие внесёт свою скромную лепту в будущее процветание нашей страны.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: МГГУ, 2001. – 656 с.
2. Горное дело. Терминологический словарь. – М.: Недра, 1990. – 694 с.
3. Основы физики горных пород./В.В. Ржевский , Г.Я. Новик – М.: Недра, 1978. – 390 с.
4. Добыча урана методом подземного выщелачивания. – М.: Атомиздат, 1980. – 248 с.
5. Аренс В.Ж. Разработка месторождений самородной серы методом подземной выплавки. – М.: Недра, 1973. – 264 с.
6. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых / В.Ж. Аренс, Б.В. Исмагилов, Д.Н. Шпак – М.: Недра, 1980. – 229 с.
7. Крейнин Е.В. Подземная газификация угольных пластов. – М.: Недра, 1982. – 151 с.
8. Бочко Э.А. Бурение и оборудование геотехнологических скважин. – М.: МГРИ, 1982. – 103 с.
9. Бабичев Н.И. Технология скважинной гидродобычи полезных ископаемых. – М.: МГРИ, 1981. – 84 с.
10. Бабичев Н.И. Проектирование геотехнологических комплексов.– М.:МГРИ, 1985. –128 с.
11. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. – М.: Недра, 1989. – 229 с.
12. Дядькин Ю.Д. Использование тепла Земли. – Л.: ЛГИ, 1987. – 407 с.