



И.И.МЕДВЕДЕВ
Г.Д.ПОЛЯНИНА

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ



И. И. МЕДВЕДЕВ,
Г. Д. ПОЛЯНИНА

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ
НА КАЛИЙНЫХ
РУДНИКАХ

Медведев И. И., Полянина Г. Д. Газовыделения на каллийных рудниках. М., «Недра», 1974, стр. 168.

Книга представляет собой первое систематизированное издание, обобщающее теоретические и практические достижения в области борьбы с газовыделениями и газодинамическими явлениями на каллийных рудниках СССР и за рубежом. В ней приведены методики исследований и сведения о газопосности полезных ископаемых и вмещающих пород наиболее крупных соляных месторождений мира. Изложены данные о составе газов, видах их выделения, газовом балансе при выполнении различных технологических операций, приведены методы борьбы с обычными газовыделениями. Подробно рассмотрены современные представления о природе внезапных выбросов соли и газа, методы прогноза и предупреждения внезапных выбросов, которые используются в мировой практике.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников каллийных рудников, научно-исследовательских и проектных институтов и студентов горных вузов.

Таблиц 20, иллюстраций 65, список литературы — 41 назв.

ЦЧ

30380

Гос. в Библиотечная
научно-техническая
библиотека
ЭКЗЕМПЛЯР
ЧИТАЛЬНОГО ЗАЛА

ЦЧ-22715

М $\frac{30708-073}{043(01)-74}$ 345-74

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкая программа развития калийной промышленности в нашей стране, освоение новых месторождений и расширение объемов разработки эксплуатируемых калийных месторождений связаны с решением проблем, направленных на повышение производительности труда и безопасности работ.

Эксплуатация первенца калийной промышленности — Солликамского калийного рудника показала, что разработка калийных пластов сопровождается значительными газовыделениями, внезапными выбросами и обрушениями. Эти явления представляли серьезную опасность при ведении очистных и подготовительных работ на карналлитовых пластах. При разработке сильвинитовых пластов происходили лишь незначительные выделения горючих газов, которые не представляли серьезной опасности для людей.

В связи с освоением глубоких горизонтов, интенсификацией добычных процессов, внедрением комбайновой выемки в новых горно-геологических условиях число газодинамических явлений на калийных рудниках, как показала практика разработки Старобинского и новых шахтных полей Верхнекамского месторождений, резко возросло. При этом внезапные обрушения и выбросы, а также загазирования выработок стали происходить не только на карналлитовых, но и на сильвинитовых пластах. Эти явления повышают опасность работ, затрудняют или ограничивают применение механизации, вызывают значительные потери подготовленных запасов, нарушают устойчивость целиков и кровли, создают перебои в добычных работах. Поэтому разработка эффективных мер борьбы с газодинамическими явлениями в условиях калийных рудников — одна из актуальных задач, требующая незамедлительного решения. Богатый опыт борьбы с грозными газодинамическими явлениями в угольной промышленности не может быть перенесен в практику калийных рудников без учета горно-геологических и горнотехнических условий разработки калийных месторождений и всестороннего изучения особенностей этих явлений. В связи с этим особо важное значение приобретает тщательное исследование всех вопросов, связанных с газоносностью и газопроявлениями на калийных рудниках страны.

В настоящей книге изложены результаты многолетних исследований, выполненных авторами на Верхнекамском, Старобинском и Индерском месторождениях по изучению газоносности и газовой деленый, а также обобщен опыт борьбы с этими явлениями, используемый на отечественных и зарубежных калийных рудниках. Главы I—III и § 1 и 2 гл. IV написаны авторами совместно, § 3 и 4 главы IV и главы V и VI — Г. Д. Поляниной. Научное редактирование книги выполнено И. И. Медведевым.

Авторы выражают благодарность работникам калийных комбинатов Верхнекамского и Старобинского месторождений, оказавшим большую помощь в проведении шахтных наблюдений и организации опытно-промышленных исследований, а также К. З. Ушакову за ценные замечания, сделанные при подготовке книги к изданию.

Первая попытка обобщения обширного материала по газоносности и газопроявлениям на калийных рудниках является нелегкой задачей. Авторы будут благодарны за все критические замечания по этой книге.

Глава I

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

§ 1. Горно-геологические условия разработки

Главнейшими калийными месторождениями СССР являются: Верхнекамское на Урале, Старобинское в Белорусской ССР, Прикарпатское близ Калуша и Дрогобыча, Гаурдакское в Туркменской ССР, Жилианское в Казахской ССР и др.

Наиболее известные калийные месторождения за рубежом находятся в ГДР, ФРГ, Франции, США, Канаде и в Испании.

Калийные месторождения имеют осадочное происхождение и носят, как правило, ярко выраженный пластовый характер. Однако в большинстве случаев в результате тектонических процессов пласты подвергались смятию. Тектонические нарушения наблюдаются на Верхнекамских рудниках, на месторождениях УССР и в еще большей степени на рудниках ГДР и ФРГ.

Верхнекамское месторождение представлено тремя рабочими пластами: сильвинитовыми Красным II и А—Б, мощность которых составляет соответственно 5—8 и 2,5—3 м, и карналлитовым В мощностью 6—18 м (рис. 1). Между рабочими пластами находятся слои каменной соли мощностью 2—6 м, а также нерабочие пласты сильвинита Красного I и Красного III. Под рабочими пластами залегает толща подстилающей каменной соли.

Пласт Красный II — основной промышленный пласт сильвинита. Представлен чередованием прослоев сильвинита и каменной соли. Пласт подразделяется на семь слоев сверху вниз. Нечетные слои представлены прослоями сильвинита, чередующимися с прослоями каменной соли, четные — каменной солью с тонкими прослоями и вкраплениями сильвинита.

Пласт А—Б состоит из двух пластов: верхнего Б и нижнего А и имеет невыдержанный состав. Пласт Б может быть представлен карналлитом или смешанными солями или пестрым сильвинитом мощностью от 0,6 до 2,5 м. В последнем случае он разрабатывается совместно с пластом А сильвинитовой зоны. Пласт А имеет

полосчатое строение, обусловленное частым переслаиванием сильвинита и каменной соли. Средняя мощность пласта 1,7 м.

Пласт В залегает в нижней части карналлитовой толщи, местами имеющей мощность до 100 м. Пласт В делится на шесть слоев

Пласт (индекс)	Средняя мощность пласта, м		Разрез
	БКР	СКР	
Карналлит	4	7,5	
Каменная соль (В-Г)	2,5	3,8	
Карналлит (В)	10,5	14,25	
	0,3	0,3	
	0,5	0,6	
Каменная соль (Б-В)	2,0	3,1	
Сильвинит (А-Б)	3,5	4,5-6,0	
	0,4	0,45	
	0,6	0,6	
Каменная соль (I-A)	3,5-4,0	3,85	
Сильвинит (Красный I)	1,5	1,9	
Каменная соль (Красный I-II)	1,5-2,0	2,5	
„Коржик“	1,02	0,85	
Сильвинит (Красный II)	6,7	7,2	
Каменная соль (Красный II-IIIa)	2,3	3,0	
Красный IIIa	1,0	1,25	
Красный IIIa-IIIб	1,5	1,5	
Красный IIIб	1,2	1,3	
Красный IIIб-IIIв	2,0	2,0	
Красный IIIв	1,3	1,3	
Нижняя каменная соль	до 400	до 400	

Рис. 1. Разрез продуктивной толщи Верхнекамского месторождения

от первого до шестого снизу вверх, причем слоистость более или менее отчетливо выражена в нижних слоях. С приближением к кровле появляются разрывы слоев и прослоек. В кровле карналлитового пласта В залегает пласт каменной соли В—Г

мощностью 2 м, в нижней части которого имеется несколько глинистых прослоек.

Над калийными солями залегает покровная каменная соль, мощность которой достигает 70 м. На некоторых участках месторождения она отсутствует. Покровная соль защищает калийные пласты от проникновения агрессивных вод из сильнообводненных глинисто-мергелистых пород, залегающих выше.

Породы, залегающие выше соляной толщи, сильно обводнены. Непосредственно над соляной толщей располагается горизонт контактовых рассолов, имеющий сообщение с вышележащими водоносными горизонтами. Рассолы, находящиеся под большим гидростатическим давлением, осложняют разработку Верхнекамского месторождения.

Соляная толща месторождения имеет небольшое падение с востока на запад. Кровля соляной толщи на всей площади месторождения образует четыре антиклинальных поднятия, разделенных синклиналиями понижениями с разницей в отметках 200—250 м.

Участок месторождения, разрабатываемый Первым Березниковским рудником (1БКР), располагается в пределах вершины западного склона Березниковского брахиантиклинального поднятия, участок месторождения Соликамского рудника — в пределах сводовой части Соликамской брахиантиклинали. Глубина залегания рабочих пластов на рудниках 200—280 м.

Шахтное поле Второго Березниковского рудника (2БКР) располагается в 12 км к юго-востоку от города Березники. Средняя мощность пластов А—Б и Красного II в пределах шахтного поля Второго Березниковского рудника составляет соответственно 2,43 и 4,77 м. Эти пласты, а также вмещающие породы содержат большое число глинистых прослоек мощностью от долей сантиметра до 1—2 см. Глубина горных работ составляет 300—390 м.

Тектонические структуры первого порядка на месторождении осложнены структурами второго, третьего, четвертого и пятого порядков. Складки четвертого и пятого порядков образуются в основном слоями и прослоями, слагающими пласты, и относятся к внутренней тектонике пластов — микротектонике. Наиболее мягким является пласт А—Б, имеющий резко выраженные складки с амплитудой 5—8 м.

Мощность карналлитовых слоев под влиянием тектонических процессов резко изменяется, иногда снижаясь или увеличиваясь в несколько раз. Особенно большое изменение мощности наблюдается по шестому слою карналлитового пласта В, причем наиболее резко изменяются отметки кровли верхнего шестого слоя; почва же этого слоя более сглажена. Гипсометрия шестого слоя карналлитового пласта В показана на рис. 2. Ширина складок от 4 до 20 м с амплитудой 3—8 м. Под влиянием тектонических процессов пласт каменной соли В—Г местами разорван и имеет вид

глыб различных размеров в карналлитовой породе. В пластах В—Г и В часто встречаются тектонические трещины.

Старобинское месторождение калийных солей, так же как и Верхнекамское, имеет пласты со спокойным залеганием, с углом

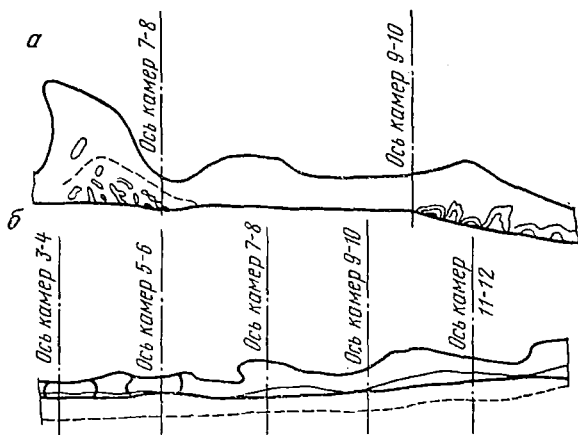


Рис. 2. Продольный вертикальный разрез:
 а — западного выемочного штрека № 6 Первого Березниковского рудника; б — выемочного штрека № 75 Соликамского рудника

падения 2—6°. Соленосная толща характеризуется четко выраженной локальной складчатостью, вызванной сдвижением пластов соли в сторону падения.

На месторождении имеется четыре калийных горизонта: первый, второй, третий и четвертый (сверху вниз). Промышленное значение имеет только второй горизонт и нижняя сильвинитовая пачка третьего горизонта.

Второй калийный горизонт залегает на глубине от 369 до 698 м. Мощность рабочего пласта колеблется от 1,0 до 4,38 м и в среднем равна 2,6 м. Пласт разделяется на три пачки. Верхняя и нижняя пачки представлены чередующимися прослойками (мощностью до нескольких сантиметров) сильвинита и каменной соли. Мощность нижней пачки колеблется от 0,60 до 1,30 м, верхней — от 0,43 до 1,15 м. В средней части пласта залегает слой каменной соли мощностью от 0,55 до 1,20 м. По всему пласту встречаются редкие миллиметровые прослои зеленовато-серых глин. Такое строение пласта сохраняется на всей площади месторождения, за исключением крайней западной части, в которой средняя пачка каменной соли полностью замещена глиной. Мощность и число прослоев глины и каменной соли в нижней и особенно в верхней пачке возрастают, за счет чего увеличивается общая мощность пласта, а качество его ухудшается.

Третий калийный горизонт залегает на глубине от 358 до

899 м. Мощность пород, расположенных между вторым и третьим калийными горизонтами, изменяется от 128 до 199 м. Третий калийный горизонт является основным на Старобинском месторождении. Он подразделяется на три пачки: верхнюю и нижнюю (сильвинитовые) и среднюю (глинисто-карналлитовую). Промышленное значение имеет только нижняя сильвинитовая пачка, которая на всей площади месторождения подразделяется на шесть сильвинитовых слоев (считая снизу). Общая мощность нижней сильвинитовой пачки колеблется от 2,05 до 8,50 м, мощность отдельных слоев — от 0,15 до 1,50 м. Сильвинитовые слои разделены прослоями каменной соли мощностью 0,55—1,10 м. В этих прослоях встречаются гнезда сильвина, прослойки сильвинита и прослойки глины мощностью от нескольких миллиметров до 2—3 см.

Гидрогеологические условия месторождения благоприятны: контакт между соляными и покровными отложениями сухой.

Прикарпатские калийные месторождения СССР приурочены к соленосной толще третичных отложений, сложенной засоленными глинами с линзообразными включениями каменной соли и залежей калийных солей. Наиболее крупные из них: Калушское, Стебниковское, Гольньское и Домбровское.

Калушское месторождение представлено наклонными или пологими пластами сильвинита и каннита, залегающими на глубине от 30 до 280 м в соленосных глинах. В пределах промышленного контура Северного поля установлено наличие двух линзообразных пластов сильвинита, сходящихся по падению в один пласт. Мощность верхней части верхнего пласта 3—27 м, средняя мощность нижнего пласта 2,56 м. В нижней части соленосной толщи встречаются темно-серые иловатые, сильно перемятые и рассланцованные глины. Эти глины весьма неустойчивы и газоносны. Северное каннитовое поле, расположенное в 1 км на юго-восток от Северного поля, представлено пластообразной линзой с максимальной мощностью около 35 м. Южнее города Калуш расположено Хотинское сильвинитовое поле, представленное тремя сильвинитовыми линзами. Первая линза с углом падения 2—12° имеет мощность от 1,5 до 13 м. Вторая линза мощностью 24 м залегает ниже первой на 9 м. Третья линза находится за контуром подсчета запасов и промышленного значения не имеет.

В глубоких горизонтах, расположенных ниже соленосной толщи, имеются мощные скопления горючих газов, представленных на 95% метаном. Месторождение газа имеет промышленное значение и разрабатывается.

Индерское месторождение расположено в Прикаспийской впадине. Оно представлено отдельными, чаще всего крутыми пластообразными линзами калийных солей сложного состава мощностью до нескольких метров.

Месторождения районов Стассфурта (ГДР) и Ганновера (ФРГ) характеризуются сильной нарушенностью с образованием во мно-

гих случаях купольных структур и большой глубиной залегания (от 600 до 1200 м). В бассейнах Верра и Фульда (ГДР) калийные отложения большей частью залегают горизонтально или мульдообразно, без особых нарушений.

§ 2. Системы разработки

Разнообразие условий залегания калийных месторождений в СССР и за рубежом вызывает необходимость применения различных систем разработки. Трудности разработки этих месторождений чаще всего связаны с опасностью проникновения агрессивных вод в горные выработки, с особенностями проявления горного давления и с газоносностью соляных пород.

А. Н. Андренчев классифицирует все калийные месторождения по горнотехническим условиям применения отдельных способов разработки на четыре группы [2].

Месторождения I группы представлены горизонтальными или пологими пластами с небольшими тектоническими нарушениями. Непосредственная кровля пластов — прочная каменная соль. Выше залегает покровная каменная соль, защищающая рабочие пласты от проникновения воды из вышележащих водоносных горизонтов. Эти месторождения разрабатываются камерной системой, не допускающей значительного сдвижения пород кровли.

При разработке месторождений II группы, когда имеется мощная толща покровных пород, допустимо плавное опускание кровли. В этих случаях возможно применение камерной и камерно-столбовой систем. Месторождения III группы (в вышележащих породах отсутствуют водоносные горизонты) могут разрабатываться с обрушением кровли без оставления целиков. При этом используются сплошные, столбовые и комбинированные системы разработки. На месторождениях IV группы (при наклонных и крутых пластах) могут применяться различные системы разработки рудных месторождений. Возможно применение открытого способа разработки.

Наибольший удельный вес в добыче калийных солей имеют рудники, разрабатывающие месторождения I и II группы, представленные пологими пластами. Типичным примером могут служить системы разработки, применяемые на Верхнекамских и Старобинских калийных рудниках.

На Верхнекамских калийных рудниках применяют камерную систему разработки без закладки (пласт А—Б и Красный II) и с закладкой (пласты В и Красный II). Камеры сильвинитовых и карналлитовых пластов располагают по простираению параллельно складчатости и таким образом, что оси камер всех трех пластов находятся одна под другой. Такое расположение, а также ширина камер и целиков (табл. 1) обусловлены необходимостью ведения работ без нарушения сплошности пород кровли (водозащитной толщи).

Таблица 1

Рудник	Полезное ископаемое, порода	Глубина разработки, м	Размеры камер, м		Ширина целлюлов, м	Условия разработки
			ширина	длина		
Соликамский	Сильвинит	250	16	150—200	11	Без закладки
	Карналлит		8	150—200	19	С закладкой
Первый Березниковский	Сильвинит	280	16	150—200	10	С закладкой
Первый Солигорский	»	418—589	8	200	6	Без закладки
Калушский	»	250	12	100—120	6	С закладкой
Стебниковский	Каннит, лангбейнит		12	40—60	6	Без закладки
«Фолькенрода» (Южный Гарц)	Сильвинит	1100	8	150—300	5	С закладкой
«Берлепш-Майбах»	Карналлит	700	12	—	12	Без закладки
«Глюкауф» «Ротслебен»	Сильвинит	700—800	10	300	5	С закладкой
	Хартзальц	400	15	240	7,5	С закладкой

Шахтное поле разбивают на панели. Откаточные штреки проходят в подстилающей каменной соли на расстоянии 300—400 м друг от друга. С панельных откаточных штреков на рабочие пласты проходят гезенки, используемые для спуска руды, перемещения грузов, передвижения людей и целей вентиляции. Гезенки выходят на выемочные штреки, проводимые по рабочим пластам. Перпендикулярно выемочному штреку по обе его стороны нарезают камеры, располагаемые параллельно друг другу.

При мощности пласта до 3 м сильвинит вынимают из камер одним слоем (пласт Красный II), при большей мощности — одним (веерная отбойка) или двумя слоями. В последнем случае вначале на всю ширину камеры вынимают первый слой у почвы пласта, причем через каждые 50—70 м в междукамерном целике со стороны отработанной камеры проводят вентиляционную сбойку. Выемка сильвинита производится с помощью буровзрывных работ. После выемки первого слоя приступают к выемке второго. Отбитый сильвинит доставляется скрепером к рудоспуску, из которого осуществляется погрузка сильвинита в вагонетки.

При веерной отбойке (рис. 3,а) по оси будущей камеры комбайном проводят разрезной штрек, соединяющий выемочный и вентиляционный штреки. Из разрезного штрека бурят веерообразно расположенные скважины. Руду отбивают на все сечение камеры взрыванием нескольких вееров. Доставляют руду от забоя до ру-

доспуска либо скреперами, либо самоходными вагонетками. Погрузка руды в вагонетки осуществляется погрузочными машинами.

Отработка карналлитовых камер ведется почвоуступным забоем (рис. 3,б). С опережением вынимают первый верхний слой, затем второй, третий и т. д.

Число уступов зависит от мощности вынимаемых слоев пласта *B*. При слое мощностью 6—8 м выемка производится тремя или четырьмя уступами, причем забой верхнего уступа опережает нижележащий на 3—4 м. Такой порядок отработки карналлитовых камер наиболее безопасен, так как при почвоуступном расположении забоев уменьшается вероятность обрушения карналлита.

Ввиду значительно меньшей устойчивости карналлита по сравнению с сильвинитом ширина камер принимается 8 м, а ширина междукамерных целиков 19 м. Отработанные камеры закладываются либо сухой каменной солью, либо мокрой — отходами переработки руды на обогатительной фабрике.

На руднике Первого Солнгорского калийного комбината также принята камерная

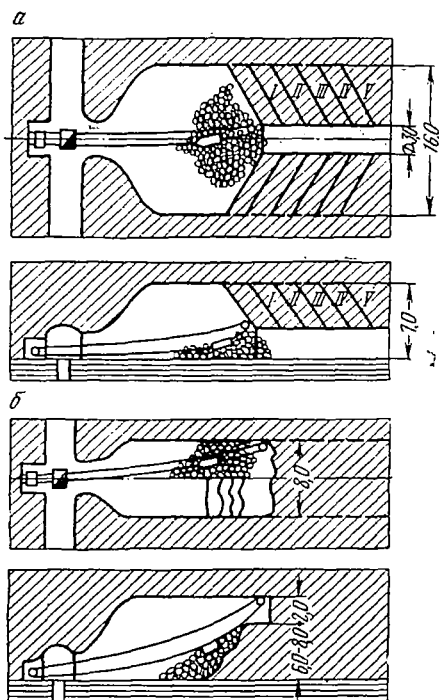


Рис. 3. Схема отработки камер

система разработки при панельном способе подготовки. Ширина панели 400 м. Панели по длине разбивают на блоки шириной 400 м. По оси блока перпендикулярно панельному откаточному штреку проводят блоковый транспортный штрек тремя ходами комбайна с целиками между ними по 2,5 м. Затем в целиках разделяют окна для разворота комбайна при переходе его из одной камеры в другую. Из крайних ходов блокового транспортного штрека производится засечка будущих очистных камер. В центральном комбайновом ходе штрека устанавливают скребковый конвейер, транспортирующий руду до ленточного конвейера, установленного на панельном транспортном штреке. Один из крайних ходов блокового штрека используется для движения самоходного транспорта с материалами и оборудованием.

Камеры шириной по 8 м располагаются параллельно панельному штреку по обе стороны от выемочного блокового штрека.

Предварительно по оси будущей камеры проводится разрезной штрек одним ходом комбайна до соединения с вентиляционным штреком. Затем обратным ходом комбайна вынимают руду на полное сечение камеры буровзрывным способом. Отбитую руду скрепером транспортируют до скребкового конвейера, установленного в выемочном штреке. Кровлю камер ввиду ее низкой устойчивости крепят железобетонной анкерной крепью.

Калушское и Гольнское месторождения разрабатываются аналогично Верхнекамскому и Старобинскому. Отработанные камеры закладываются отходами обогатительной фабрики.

Камерная система разработки применяется на многих калийных месторождениях СССР и за рубежом. В табл. 1 приведены данные о параметрах камерной системы разработки некоторых рудников.

Камерную систему разработки применяют также и при разработке крутых пластов, например, на Стебниковском месторождении и ряде других. Для разработки крутых пластов применяются системы, характерные для рудных и угольных месторождений: систему поэтажных ортов и штреков, слоевые системы, выемку полосами по простиранию и т. п. Поскольку эти системы имеют весьма незначительное распространение на калийных рудниках, рассматривать их здесь нет необходимости.

На калийных рудниках ГДР и ФРГ широкое распространение получили камерная система разработки с обрушением потолочины горизонтальными слоями снизу вверх с закладкой и другие разновидности слоевых систем.

В тех случаях, когда породы кровли способны плавно опуститься, а вышележащие породы не имеют водоносных горизонтов, применяется камерная система с частичной выемкой целиков или камерно-столбовая система.

Частичная выемка целиков при применении гидравлической закладки отработанных камер применялась на Калушском руднике. В ГДР такие работы проводились на рудниках «Блейхерода», «Глюкауф» и др. Выработанные камеры были заложены отходами обогащения и пустой породы. По оси целика шириной 10 м проходили выработку шириной 4 м и высотой 2 м. Затем эти выработки расширяли в высоту и ширину и таким образом отработывалась часть целика. Работы по частичной выемке целиков проводились на руднике «Сольвей» около Бернбурга при разработке линзы карналлита мощностью 50 м и в Южном Гарце при разработке линзы хартзальца мощностью 30 м. Во всех случаях производилась полная закладка выработанного пространства.

Системы разработки с длинными очистными забоями и полным обрушением кровли получили распространение в Эльзасе (Франция). На рудниках применяется в основном столбовая и комбинированная (камерно-столбовая) системы разработки. На пласте

мощностью 1—1,6 м выемку осуществляют лавами длиной 80—100 м по простиранию. Забой подрубается врубовой машиной. Производится частичная закладка выработанного пространства — обрушенная порода опускается на бутовые полосы. Эту систему разработки можно применять на Солигорских рудниках.

В настоящее время на Старобинском и Верхнекамском месторождениях СССР ведутся работы по изысканию более совершенных систем разработки и технологии добычи калийных солей.

§ 3. Физико-механические свойства и структура соляных пород

Газовыделения в значительной мере связаны с физико-механическими свойствами и строением горных пород. Наибольшее значение имеют структура, пористость, трещиноватость и газопроницаемость, а также прочностные характеристики пород, их упругость и пластичность.

Структура сильвинита, карналлита, каменной соли зернистая (кристаллическая). Кристаллы бывают от мелких (размером 0,1 мм) до крупных (2—3 см). В слоях и пластах структура может быть однородной и разнотекстурированной.

Пористость. Соляные породы в основном плотные и имеют незначительную пористость. Открытая пористость сильвинита Верхнекамского месторождения изменяется от 0,7 до 1,6%, общая — от 1,0 до 2%. Значения открытой и общей пористости близки, следовательно, большинство пор открытые. Пористость карналлита не определялась.

Однако на некоторых месторождениях встречаются участки пород со значительной пористостью. Они, как правило, связаны с более высокой газоносностью. К таким участкам относится, например, вторичный сильнопористый сильвинит бассейна Верра — носитель углекислого газа.

Трещиноватость. Равномерно развитой трещиноватости у соляных пород не наблюдается, по-видимому, потому, что они обладают способностью залечивать трещины. Наибольшей трещиноватостью среди соляных пород Верхнекамского месторождения обладает карналлит. По данным работы [3], в карналлитовом пласте встречается не менее восьми видов трещин, которые В. А. Вахрамеева разделяет на две главные группы: тектонические и образовавшиеся в результате ведения горных работ.

В свою очередь, тектонические трещины подразделяются на:
а) микродеформации кристаллов (следы скольжения) — системы тончайших линий, которые почти на всех кристаллах карналлита можно видеть невооруженным глазом; встречаются раздробленные кристаллы;

б) тонкие неровные трудноразличимые трещины; местами по ним наблюдаются мелкие надвиги, а также «отрицательные кристаллы», наполненные газом; такие трещины встречаются часто;

в) диагональные трещины скалывания, направление которых совпадает с направлением трещин пласта *Б—В* или *В—Г*;

г) кливаж — частые (через 5—7 см) параллельные трещины, расположенные приблизительно параллельно осевым поверхностям складок; встречаются в антиклинальных частях крупных складок; мелкие отдельности породы, ограниченные трещинами кливажа, приобрели линзовидную или клиновидную форму; они легко разбираются руками; зерна карналлита в них рассланцованы;

д) горизонтальные или пологие трещины (надвиги) встречаются редко;

е) крутонаклонные, почти вертикальные трещины, встречаются также редко.

В результате ведения горных работ образуются трещины откалывания и характерная трещиноватость стенок полостей выбросов.

Образование трещин откалывания (заколов) наблюдается во всех старых выработках сильвинитовых и карналлитовых пластов.

На месторождениях с сильной тектонической нарушенностью трещиноватость может быть более развитой. Так, в каменной соли Индерского месторождения встречаются тектонические трещины длиной до нескольких метров.

Газопроницаемость горных пород может служить одним из исходных данных для расчета газовыделений в горные выработки. Сведения о газопроницаемости калийных солей весьма скудны. В большинстве случаев в образцах каменной соли, сильвинита и карналлита отсутствует проницаемость по воздуху, водороду, азоту и радону. По данным Ю. В. Морачевского, максимальные значения коэффициента проницаемости составили от 0,00017 до 0,09 мдарси по радону и от 0,0085 до 0,05 мдарси по воздуху. В последнем случае, например, через образец сильвинита пласта Красного II за 40 сут прошло 8 см³ газа. По нашим данным, коэффициент проницаемости образцов каменной соли и сильвинита пласта Красного II Второго Березниковского рудника по азоту изменяется от нуля до 0,03--0,642 мдарси.

Анализ материалов по изучению газопроницаемости образцов солевых пород показал, что однородные по своему составу и строению образцы практически непроницаемы. Большинство из проницаемых образцов имело включения глины или кристаллы другого минерала. По-видимому, газ проникал по контактам разнородных кристаллов или кристаллов с глинистыми прослоями.

На Соликамском руднике под руководством А. А. Черепеникова определялась газопроницаемость сильвинита в массиве. Сущность методики заключалась в следующем: в массиве сильвинита бурили несколько шпуров диаметром 40 мм и глубиной 3 м (один центральный, остальные вокруг него на расстоянии 5—15 см). Все шпуры герметизировали и к каждому из них присоединяли манометр. В центральный шпур нагнетали кислород из баллона. Мак-

симальное давление в центральном шпуре составило 23 кгс/см². При этом в соседних шпурах заметного увеличения давления не произошло.

Этот опыт был проведен в стенке выработки, пройденной по пласту А—В буровзрывным способом.

Таким образом, максимальная газопроницаемость соляной толщи может быть обусловлена наличием глинистых прослоев и тектонических трещин.

Прочностные свойства соляных пород Верхнекамского месторождения исследовались во ВНИИГ и ПермНИУИ. Пределы прочности кубических образцов с размерами сторон 5 см представлены в табл. 2. В этой таблице приведены также данные по прочности цилиндрических образцов диаметром 5,7 см каменной соли Индерского месторождения.

Таблица 2

Полезное ископаемое, порода	Предел прочности образцов, кгс/см ²			Модуль упругости $E \cdot 10^6$, кгс/см ²	Коэффициент Пуассона μ	Степень пластичности
	на сжатие $\sigma_{сж}$	на изгиб $\sigma_{из}$	на разрыв $\sigma_{р}$			
Верхнекамское месторождение						
Каменная соль	360	25,3	4,6	150	0,31	0,53
Сильвинит пласта Красного II	350	21,0	6,1	100	0,61	1,30
Сильвинит пласта А	250	24,8	2,7	63	0,41	5,16
Сильвинит пласта В	250	19,9	4,3	97	0,49	1,77
Карналлит пласта В	150	15,9	1,9	90	9,42	—
Индерское месторождение						
Каменная соль	380	—	27,9	1	0,2	—

Прочность образцов карналлита шестого слоя пласта В Соликамского рудника (СКР) и ИБКР на сжатие, несмотря на различие в их структуре (рис. 4), одинакова. Прочность образцов, отобранных в местах раздувов шестого слоя, меньше прочности образцов карналлита шестого слоя на 20% [6].

Данные по прочности на сжатие соляных пород некоторых калийных рудников ГДР приведены в табл. 3. Отношение высоты к диаметру цилиндрических образцов составило 1,0; диаметр образцов колебался в пределах 60—180 мм. Скорость нагружения выдерживалась постоянной в пределах 5—10 кгс/(см²·с).

Из табл. 2 и 3 видно, что значения прочности на сжатие некоторых соляных пород (каменной соли, сильвинита пластов А, В и Тюринген) различных калийных месторождений и бассейнов

близки, в то время как прочность карналлита колеблется в широких пределах — от 84 до 200 кгс/см², что зависит не только от его строения, но и от минерального состава. Карналлит относи-

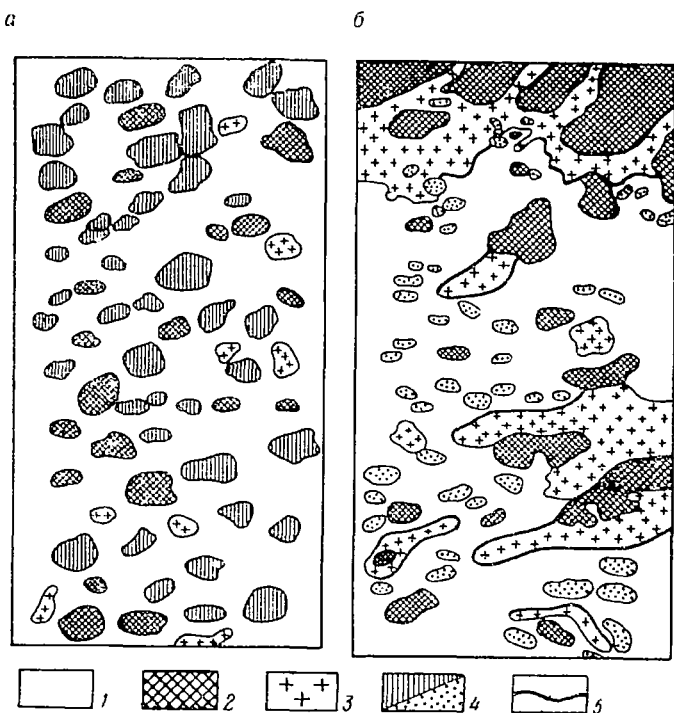


Рис. 4. Структура карналлита:

a — Соликамского; *b* — Березниковского: 1 — карналлит бледно-розовый мелкозернистый; 2 — карналлит оранжево-красный крупнозернистый; 3 — каменная соль сняя мелкозернистая; 4 — карналлит темно-красный крупнозернистый; 5 — глинисто-ангидритовые прослои

тельно более высокого качества (с наименьшими примесями галита и сильвина) имеет меньшую прочность.

В практике разработки Верхнекамского месторождения карналлит обычно характеризуют как весьма хрупкий материал. Однако еще в первоначальный период разработки карналлитового пласта Н. К. Сабиневским, а также маркшейдерской службой Соликамского рудника была установлена способность карналлита деформироваться пластически. Она выражалась в увеличении объема породы после освобождения ее от всестороннего сжатия. Кроме того, было замечено, что происходит сжатие по высоте междукammerных целиков, а ширина выработки уменьшается наиболее интенсивно в первые 2—3 месяца после отработки камеры.

Бассейн	Рудник или глубокая скважина	Полезное ископаемое, порода	Прочность на сжатие, кгс/см ²
Верра	«Маркс—Энгельс», пласт Тюринген	Обломочный карналлит	100—200
	«Фелькерсхаузен З» «Фраунзее З», «Кизелбах»	Верхняя каменная соль	325
	То же	Средняя каменная соль	320
	«Маркс—Энгельс», пласт Хессен	Верры	260—407
	«Менценграбен», пласт Тюринген	Хартзальц	250—260
Южный Гарц	«Нора б»	Сильвинит	304
	«Тойченталь» (около 2—4 м над пластом Унструт)	Каменная соль	84—122
Средне-немецкий	«Нойстассфурт б» (основные пласты L и P)	Карналлит	96—146
	«Берлепш-Майбах» (пласт Паллас-Цее)	»	164
		»	

Наблюдения за состоянием горных выработок на калийных рудниках ГДР, в которых целики карналлита деформировались сильнее, чем целики сильвинита или хартзальца, показали, что карналлит относится к нехрупким горным породам (неопасным с точки зрения возможности их мгновенного разрушения).

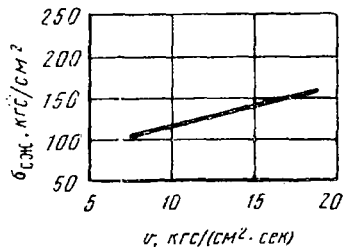


Рис. 5. Зависимость прочности карналлита на сжатие от скорости нагружения

Более поздними исследованиями [4] было установлено, что деформационные свойства карналлита зависят от величины нагрузки и скорости ее приложения. При быстром нагружении карналлит разрушается хрупко — с малыми деформациями. При постепенном длительном нагружении карналлит способен деформироваться пластично, причем деформации могут достигать 10%. Напряжение в 60% и более от предела прочности со временем приводит к разрушению карналлита.

На рис. 5 показано влияние скорости нагружения, исследованное в определенных границах [36]. Причем было установлено, что при разных скоростях нагружения интенсивность разрушения образцов неодинакова: при увеличении скорости нагружения воз-

растает удельный вес мелких классов, т. е. разрушение приобретает характер раздробления. Так, при увеличении скорости нагружения от 2 до 150 кгс/(см²·с) удельный вес частиц класса ≤ 10 мм увеличивается на 13%, а удельный вес частиц класса > 10 мм уменьшается приблизительно на 60%.

Таким образом, на основании испытаний прочности карналлита на сжатие при разных скоростях нагружения вплоть до удара было установлено, что интенсивность разрушения не является постоянным свойством пород, а проявляется только при определенном значении скорости нагружения.

Изучая причины разрушения горных пород при обрушениях и горных ударах, происходящих на калийных рудниках ГДР, Г. Пфорр руководствовался теорией разрушения горных пород, разработанной в 1961 г. Квапиллом. Квапил считал, что при рассмотрении механизма разрушения горных пород следует учитывать не свойства породы вообще, а соотношение этих свойств при определенных внешних условиях. Определенные свойства горных пород закономерны только для определенных условий, т. е. свойства горных пород являются функцией внешних условий.

Соляные породы сухие, но не совсем лишены воды. Кроме кристаллизационной воды в солях содержатся мельчайшие включения рассолов, а также в незначительном количестве межкристаллические воды. Кроме того, в период разработки возможно появление адсорбционной воды из паров воздуха за счет высокой гигроскопичности солей. Процесс физической адсорбции протекает с огромной скоростью, а в мономолекулярном адсорбционном слое вода не растворяет те вещества, которые в свободной воде легкорастворимы.

Глава II

ГАЗОНОСНОСТЬ КАЛИЙНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

§ 1. Генезис природных газов и формы нахождения газа в калийных залежах

Разработка калийных месторождений в большинстве случаев сопровождается выделением в рудничную атмосферу взрывчатых, вредных и значительно реже ядовитых газов.

Генезис газов тесно связан с условиями формирования месторождений и последующими тектоническими процессами. Формирование месторождений происходило в различные геологические периоды. В пермский период образовались Верхнекамское, Прикаспийское, Карлсбадское (США) месторождения, а также месторождения ГДР и ФРГ. Время образования Старобинского месторождения относится к девонскому периоду, Прикарпатских и Эльзасского (Франция) — третичному. Природа образования залежей калийных солей в настоящее время объясняется двумя теориями — континентальной и лагунной.

Согласно континентальной теории, месторождения образовались в результате выщелачивания легкорастворимых солей из осадочных горных пород. Эти соли, растворенные в воде, выносились в закрытые котловины, где происходило испарение воды, выпадение в осадок солей и формирование залежей. По лагунной теории, наиболее признанной в настоящее время, залежи солей образовались путем испарения морской воды в лагунах и кристаллизации содержащихся в них солей.

Содержание солей NaCl , KCl , MgCl_2 , MgSO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ в морской воде изменяется в широких пределах — от 1,03 до 3,63% вес. Еще более высокое содержание солей в рапе некоторых континентальных озер, например в Индерском озере в СССР.

Кристаллизация солей из морской воды возможна при их концентрации около 300 г на 1 л и более, т. е. выше обычной в 10—30 раз. Такие условия возникают тогда, когда прекращается или замедляется пополнение морского бассейна водой. При испарении

происходит постоянное повышение концентрации солей до насыщения, а затем полное насыщение и далее кристаллизация.

При насыщении раствора солей в лагуне вначале выпадают в осадок наиболее труднорастворимые соли, например карбонаты кальция и магния, образуя отложения известняка, доломита и мергеля, затем все более легкорастворимые, такие, как сульфаты кальция (гипс и ангидрит), хлористый натрий (галит), смесь хлористого калия (сильвинит). При еще большей концентрации раствора могут выпасть в осадок такие соли, как каннит и кизерит, и, наконец, наиболее легкорастворимые соли (карналлит и бишофит).

Последовательность выпадения солей в осадок зависит от многих факторов: гидрогеологических, геохимических, климатических и др. Поэтому описанная последовательность выпадения солей может нарушаться, например, при неожиданном поступлении больших количеств пресной воды, с сезонным изменением климата и т. д. Пресная вода, кроме того, может приносить с собой континентальные осадки, а также выщелачивать уже образовавшиеся соляные залежи. В этом случае образуются отложения глины, суглинков.

Образование газов в залежах солей на разных месторождениях происходило неодинаково.

Существует несколько точек зрения о природе происхождения газов в солях Верхнекамского месторождения.

П. А. Сафроничкий полагает, что повышенное содержание углеводородных газов в сильвинитовой и карналлитовой толще является следствием миграции их из нефтеносных отложений, залегающих ниже соляных примерно на 260 м. В. П. Савенко считает, что появление водорода в солях вызвано радиоактивным превращением изотопов K^{40} и Rb^{87} .

Наиболее общепризнанна точка зрения Ю. М. Морачевского и А. А. Черепенникова, в соответствии с которой образование природных газов связано с процессами разложения растительных и животных остатков, вносившихся в лагуну при формировании соляных отложений. Исследования Н. К. Чудинова показали, что образование газов в большой степени связано с жизнедеятельностью микроорганизмов в солеродном бассейне. Эта точка зрения была подтверждена работами немецких ученых. В процессе кристаллизации газы захватывались массой кристаллов. В дальнейшем рассеянный в горной породе газ в период тектонических процессов под воздействием высокого давления и неравномерного его содержания в массиве стремился заполнить свободные трещины и пустоты. При этом из горной породы вследствие законов диффузии в первую очередь выжимались легкие газы (водород), затем более тяжелые (метан и углеводороды метанового ряда) и, наконец, самые тяжелые (азот).

Такой взгляд на историю образования газов и накопления свободных газов подтверждается данными по газоносности пород

Верхнекамского месторождения, где наиболее газонасыщенными являются трещиноватые зоны массива. Особенно четко эта закономерность прослеживается на карналлитовом пласте В. Кроме того, относительное содержание легких газов в свободном газе значительно выше, чем в связанном. Если в свободном газе карналлитового пласта Соликамского рудника содержится 50—80% горючих газов (водорода и метана), то в микровключенном — только 20—30%. Однако такая закономерность в составе свободных и связанных газов прослеживается не на всех соляных месторождениях. Так, по нашим данным, в каменной соли Индерского месторождения установлено присутствие водорода в связанном виде, в то время как в составе свободных газов он не обнаружен. По-видимому, состав этих газов определяется не только законами диффузии, но и другими причинами.

Захват газов в момент кристаллизации и разложение органических остатков — основные причины газонасыщенности пород Старобинского, Калушского, Артемовского и других калийных и соляных месторождений Советского Союза.

Вместе с тем на некоторых месторождениях находятся газы и нефтяного происхождения, например газы некоторых соляных пород Индерского месторождения. Состав свободных газов в них только углеводородный, причем газо- и нефтепроявления часто наблюдаются совместно.

Калийные месторождения бассейнов Верра и Фульда в ГДР образовались в результате воздействия термальных источников, богатых солями и насыщенными углекислым газом, на первоначальные калийные залежи. В третичный период под воздействием тектонических процессов образовались многочисленные трещины и разрывы в массе соли. Позднее, в период проявления локального вулканизма по этим трещинам поднимались базальтовая лава, углекислый газ и напорная вода. Углекислый газ оставался в калийном пласте, захватываясь образующимися кристаллами солей.

Многие калийные рудники ГДР и ФРГ опасны по выделениям углеводородов. Так, на рудниках Южного Гарца выделяется в основном метан и этан и в меньшей степени водород. Немецкие ученые ранее полагали, что в период формирования соляных отложений повышение концентрации рассолов приводит к уничтожению органической жизни, и поэтому газы в калийных солях не могут быть бактериологического происхождения.

Соответственно этим представлениям Баар считал, что углеводородные газы в стассфуртском калийном пласте K2 мигрируют из более глубоких битуминозных пород и вследствие мезозойских тектонических процессов попадают в калийные месторождения. Более поздними исследованиями Денера, К. Элрета, В. Гимма и других установлено, что мезозойские тектонические процессы не являются причиной газонасыщенности калийных пластов. Бактериологические исследования пласта K2 на руднике «Бернбург-Грена» показали наличие в нем окаменевших бактерий. Косвен-

ным доказательством наличия органической жизни во время образования пласта К2 служит также наличие в карналлите NH_3 —продукта разложения белка.

В работе К. Элрета [32] приведены данные по исследованию дисперсно распределенных углеводородных газов стассфуртского пласта К2. Были проведены петрографические исследования пород пропластка, взятых из различных участков полей рудников «Бернбург-Грена» и «Росслебен-I/II». Состав пропластка, первоначально сложенного кизеритовым карналлитом, под действием напорных вод был изменен и замещен хартзальцем и лангбейнитом. При исследовании определялось содержание метана, этана, пропана и бутана. Установлено, что для пласта К2 существуют две генетически независимые группы углеводородов: газы, образовавшиеся в пласте из органических веществ, которые относятся к первоначальному составу калийного месторождения, и газы, попавшие в пласт с растворами и оставшиеся в нем.

Таким образом, анализ генезиса газов различных месторождений позволяет выделить три основных источника их образования в калийных пластах и залежах;

1) газы, образовавшиеся в результате разложения органических веществ и жизнедеятельности бактерий;

2) газы, образовавшиеся в результате воздействия на калийные залежи термальных источников, богатых солями и углекислотой;

3) газы, привнесенные в калийные месторождения из окружающих битуминозных пород и нефтяных месторождений.

В соответствии с современной точкой зрения газы, накопившиеся в месторождениях, во вмещающих породах и полезном ископаемом, можно подразделить на:

свободные — скопления газов, заполняющие всякого рода трещины и пустоты;

связанные — рассеянные газы, пропитывающие массу породы, которые делятся на микровключенные (заключенные в кристаллической решетке солей) и межкристаллические (поровые, сорбированные и др.).

Свободные газы находятся под большим давлением, измеряемым десятками атмосфер. Значительные скопления свободных газов, находящихся в трещинах или полостях, при вскрытии горными работами выделяются суфлярно. Газы закрытых пор и связанные межкристаллические газы могут выделиться только при разрушении структуры породы, а внутрикристаллические — при разрушении кристаллов.

Исследования, проведенные в Польше, показали, что соли сорбируют газ при возрастании давления быстрее, чем угли. На наличие сорбированного газа в солях указывает Г. Шпакелер, который отмечает, что в открытых пустотах углекислый газ может концентрироваться на частицах соли [38]. К. Элрт объясняет накопление газов в глинистых прослоях также сорбционной спо-

способностью глинистых материалов. Однако вопросы сорбционной связи газов с соляными породами еще недостаточно изучены.

Газы, содержащиеся в кристаллах, присутствуют почти во всех соляных минералах. Освобождение микровключенного газа происходит при разрушении кристалла — при его дроблении или растворении в воде. Кристаллы некоторых солей растворяются в воде с характерным треском, связанным с разрыванием их стенок и освобождением пузырьков газа. Освобождающиеся пузырьки газа имеют давление 8—12 кгс/см² [38].

§ 2. Методика исследования газоносности

Калийные пласты могут иметь участки с различной газоносностью. Характеристика газоносности пластов должна содержать данные по количеству и составу газов для участков с обычной (средней) газоносностью, а также и для участков с газоносностью, резко отличающейся от средней по количеству и составу газов. Кроме того, необходимо знать давление газа в пласте.

При ведении подземных горных работ газ может выделяться с обнаженной поверхности массива (стенок, кровли и почвы выработок), из крупных трещин и пустот, из шпуров, а также из отбитой горной массы, находящейся в выработке. С поверхности массива и из шпуров будет выделяться в основном свободный газ, содержащийся в соединяющихся между собой порах и трещинах. Объем такого газа определяется эффективной пористостью породы и давлением газа. Из разрушенной соли может выделяться, по-видимому, как свободный, так и связанный газ.

Участки массива, содержащие одиночные крупные трещины или пустоты, заполненные газом под давлением, или участки с повышенной трещиноватостью могут содержать относительно большее количество свободного газа и в целом иметь более высокую газоносность. Более высокое по сравнению со средним содержание газа как свободного, так и связанного, имеют участки калийных пластов, опасные по внезапным выбросам соли и газа. Следовательно, для практических целей одинаково важно знать количество и состав свободного и связанного газа или суммарную, т. е. общую газоносность.

Относительно крупные скопления свободного газа, выделяющегося при вскрытии в виде суфляров, могут быть изучены только в шахтных условиях. Количество содержащегося в скоплениях газа, его состав и ориентировочное давление можно определить с помощью шпура и при наличии приспособления для его герметизации.

Состав свободных газов может быть изучен также по пробам, отобранным при обычном газовыделении из шпуров или с поверхности массива. Однако полную газоносность соляной породы, или количество газа, содержащегося в единице объема или веса породы, в шахтных условиях определить невозможно. Ввиду весьма

низкой газопроницаемости солей невозможно выделить весь свободный и связанный газ, а микровключенный газ выделяется только при разрушении кристаллов.

В. П. Шатов [28] определял газоносность как отношение суммарного газовыделения в забое (например, за сутки) к суточной добыче плюс остаточная газоносность выданной на поверхность руды. Этот метод имеет следующие недостатки:

по пробам, отобраным в шахте (с поверхности массива, из шпуров и из отбитой руды), можно точно определить состав и содержание газов, не входящих в состав атмосферного воздуха; соотношение газов, входящих как в состав природных газов, так и в состав воздуха, установить невозможно (например, содержание азота и кислорода);

газовыделение в выработку происходит не только из отбитой руды, но и из прилегающего к контуру выработки массива, поэтому неправомерно относить количество выделившегося газа к отбитой руде.

Таким образом, отношение суммарного газовыделения в забое к суточной добыче (без учета остаточной газоносности) будет характеризовать не газоносность, а относительное газовыделение на 1 т (или 1 м³) суточной добычи.

Наиболее достоверным методом изучения газоносности соляных пород, на наш взгляд, является метод, при котором весь газ из породы можно выделить в изолированную от атмосферного воздуха емкость.

В принципе выделение газов из соли невозможно следующими путями: откачкой вакуумным насосом, плавлением образцов, перемещением равновесия в растворах, механическим дроблением соли, растворением образцов.

Нами был опробован вакуумный метод выделения газов при создании максимально возможного разрежения 6—3 мм рт. ст. Как правило, удавалось выделить лишь незначительное количество газа, находящегося в образце. Метод был признан неэффективным.

Плавление образцов солей хлоридного состава сопровождается образованием хлористого водорода, поэтому данный метод также не может быть рекомендован к применению.

При растворении солей в различных жидкостях явления, сопутствующие процессу растворения, могут существенно исказить количество и состав газов в образце. Наибольшее значение имеет растворимость газов в жидкости (растворителе соли) и явление относительно уменьшения объема раствора.

В табл. 4 приведены данные о растворимости газов, которые могут присутствовать в составе природных газов калийных месторождений, в воде и водном растворе NaCl. Ошибка, связанная с уменьшением объема, может возникнуть, если растворение производить в закрытой системе в неизменном объеме растворителя. Так, если растворитель поместить в замкнутый сосуд определенной

Газы	Растворимость* при температуре °С		
	5	20	100
Содержащиеся в воде:			
азот	0,0209	0,0154	0,0095
кислород	0,0429	0,031	0,0270
диоксид углерода	1,424	0,878	0,0
водород	0,0204	0,0182	0,016
сероводород	3,977	2,582	0,810
метан	0,048	0,0331	0,0170
этан	0,0803	0,0472	0,0172
пропан	—	0,0394	—
бутан	—	0,0327	—
Содержащиеся в концентрированном водном растворе NaCl:			
азот	0,013	0,0066	—
кислород	0,0059	0,0052	—
диоксид углерода	0,577	0,393	—
водород	0,0184	0,0153	—

* Объем газа (мл), приведенный к 0°С и 760 мм рт. ст., поглощаемый единицей объема жидкости при парциальном давлении газа 760 мм рт. ст.

емкости, то при растворении в нем образца соли будет происходить не только выделение газа, стремящегося занять верхнюю часть сосуда, но и постепенное уменьшение объема раствора.

На рис. 6 показано уменьшение объема при растворении некоторых солей в воде при температуре 20°С [37]. Если обычно в солях содержится от 20 до 150 мл газа на 1 кг соли, то объем уменьшается на величину того же порядка, что и содержание газа в некоторых солях. При сложном составе растворимой соли погрешность от уменьшения объема определить очень трудно.

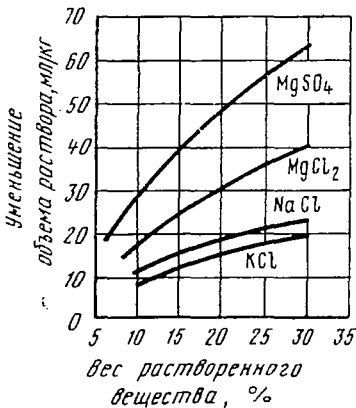


Рис. 6. Уменьшение объема раствора при растворении некоторых солей в воде

Вышеописанные отрицательные явления уменьшаются пропорционально уменьшению объема растворителя. В связи с этим была рассмотрена возможность увеличения растворимости солей в данном объеме растворителя путем перемещения равновесия в растворах [37].

Соли при растворении в жидкости диссоциируют на ионы. Смещение равновесия может произойти, если

катионы или анионы образуют вещества с малым ионным произведением (произведением растворимости). Как правило, катионы в солях неоднородны (калий, натрий, магний и т. д.) и количество их непостоянно, поэтому улавливать их затруднительно. Улавливания анионов (ионов хлора) можно достичь путем образования труднорастворимого осадка. Опыты показали, что в концентрированных растворах при улавливании анионов удается растворить лишь незначительное количество газосодержащей соли. Окисление ионов хлора до хлората сопровождается образованием ядовитого газа — хлора. Таким образом, опыты показали бесперспективность данного метода выделения газов из солей.

При применении механического дробления соли для освобождения газов имеют место следующие отрицательные явления:

- а) неполное выделение микровключенного газа вследствие недостаточно тонкого измельчения соли;
- б) увеличение объема газа в результате нагревания, возникающего при дроблении;
- в) адсорбция газа тонкоизмельченной солью.

Авторы этого метода [37] разработали установку и условия опыта, так что сопутствующие дроблению явления большей частью взаимно уничтожаются. В то же время простота метода и незначительное время, затрачиваемое на его осуществление, хотя и при недостаточной его точности, позволили авторам рекомендовать его в качестве экспресс-метода при прогнозировании газосодержимости (см. главу V).

Метод повторного растворения

Исследования показали, что достаточно точный метод определения содержания газа в солях может быть основан только на растворении.

Щрадером, Акерманном и Грундом был разработан так называемый метод повторного растворения [37]. Сущность метода состоит в следующем. Для растворения образцов используется 60—80 мл жидкости — насыщенного раствора данной соли в воде для того, чтобы исключить явление «сжатия» объема. Растворитель циркулирует в закрытой системе путем его испарения, а затем конденсации и при этом растворяет соль. Система снабжена газовой камерой, увеличение объема которой при проведении опыта соответствует объему выделившегося газа. Увеличение объема камеры, появляющееся за счет нагревания, отмечается специальным устройством.

Определение содержания газа в солях осуществляется в системе, изолированной от атмосферы (рис. 7).

Подготовка к опыту заключается в следующем. При установке уравнительного сосуда 8 над формованным изделием 7 резиновую камеру 6 закрепляют так, чтобы она была натянута без единой складки (резиновое кольцо имеет толщину 3 мм и диаметр 18 мм).

Подготовленное таким образом формованное изделие проводят через среднее высверленное отверстие резиновой пробки, снабженной трубками 12 и 13. Трубка 12 соединяется резиновым рукавом с баллоном уровня 9. Уравнительный сосуд 8 устанавливают проб-

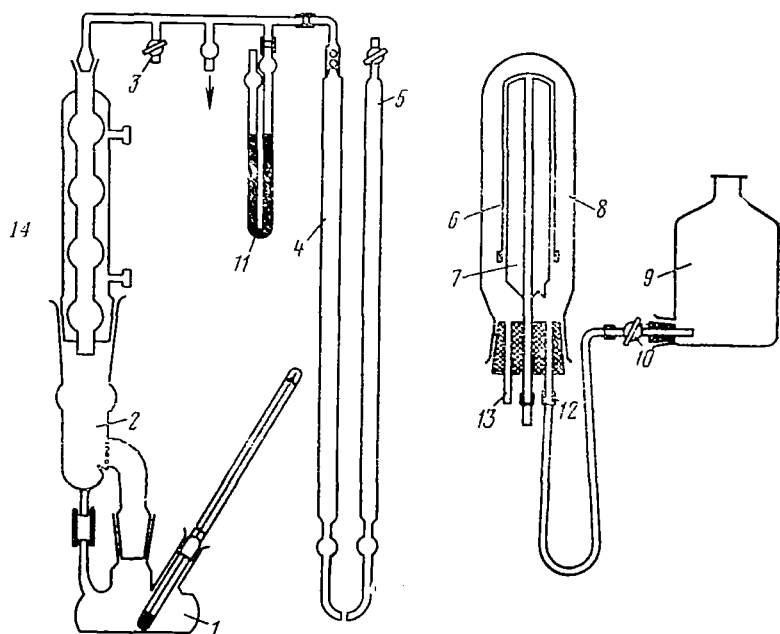


Рис. 7. Аппарат для определения содержания газа в солях методом повторного растворения

кой вверх, и через трубку 13 заполняют водой настолько, чтобы оставался зазор 3—4 мм. В баллоне уровня 9 вода (при заполненном уравнительном сосуде) должна находиться выше расположенного около дна отверстия.

Далее трубку 13 перекрывают с помощью натянутого на нее резинового рукава и зажима или пробки. Уравнительный сосуд 8 закрепляют с помощью зажима на штативе в нормальном положении (пробкой вниз). Резиновая камера 6 испытывается на герметичность, для чего из уравнительного сосуда выпускают 500—600 мл воды в баллон уровня.

Охладитель 14 питается водой постоянной температуры из термостата. Это позволяет привести температуру воды охладителя в соответствие с комнатной.

Для поддержания в аппарате равномерной температуры применяют маленький вентилятор. В потоке воздуха вентилятора выверяют термометр. Установившаяся при измерении температура соответствует температуре в колбе 1 и сосуде для растворения 2.

Нагревание колбы осуществляется в масляной ванне, так как при этом нагревание происходит равномерно, без местных перегревов, что препятствует сильным всплескам насыщенного рассола. Для регулирования температуры ванны применяют контактный термометр и соответствующее реле.

Для корректирования нужной температуры необходимо определить мертвый объем колбы и сосуда для растворения. Для этого колбу и сосуд для растворения заполняют водой до охладителя и измеряют количество необходимой для этого воды. Из полученного общего объема a вычитают объем взятого для опыта количества рассола b (75 мл) и объем пробы соли c . Например: $a = 430$ мл, $b = 75$ мл, $c = 50$ мл (100 г соли), мертвый объем $v_m = a - b - c = 305$ мл.

Благодаря применению охлаждающей воды с отрегулированной температурой температура в шаровом охладителе во время опыта остается постоянной. В газовой камере также сохраняется постоянная температура. Объем соединительной трубки и газоизмерительной бюретки 4 очень мал и им можно пренебречь.

После 20—25 измерений резиновую колбу в уравнительном сосуде заменяют новой.

Опыт проводится следующим образом. Из соли, подлежащей исследованию, при температуре кипения готовится насыщенный раствор и затем охлаждается до комнатной температуры. Часть этого раствора (75 мл) с небольшим осадком на дне помещают в колбу 1 (см. рис. 7). В сосуд для растворения 2 помещают 100 г пробы соли и устанавливают его на колбу 1. Эту колбу с сосудом для растворения соединяют с охладителем при открытом вентиляционном кране 3. Место соединения с колбой покрывают жировой смазкой, в то время как в месте соединения с охладителем вода оказывается вполне достаточным уплотнительным средством.

К начальной метке газоизмерительной бюретки 4 подводят затворную жидкость с помощью уравнительной трубки 5. Проверяют, правильно ли закреплена резиновая камера 6 на формованном изделии 7 и закрывают кран 3. Затем регулируют температуру в колбе и в сосуде для растворения с помощью вентилятора. Через интервалы времени 5 мин проверяют по уровню жидкости в газоизмерительной бюретке, изменение свободного объема в аппарате. Если объем остается постоянным, что обычно достигается через 15 мин, снова устанавливают равновесие уровней в газоизмерительной бюретке 4 и в уравнительной трубке 5 путем кратковременного открытия вентиляционного крана 3.

Показания температуры снимают с термометра, закрепленного в месте воздушного потока вентилятора, и с термометра, установленного в колбе 1. Затем колбу погружают в масляную ванну так, чтобы она была погружена в жидкость до горлышка.

Уравнительный сосуд 9 опускают ниже сосуда 8. Ванну нагревают и краном 10 регулируют слив воды из уравнительного сосуда 8 таким образом, чтобы уровень жидкости в газоизмеритель-

ной бюретке и уравнительной трубке оставался постоянным. Масло в ванне нагревают до температуры 175°С. Такая температура поддерживается на протяжении всего опыта.

Если во время растворения в перенасыщенном рассоле, находящемся в колбе, происходит толчок, из-за которого может произойти резкое изменение уровня жидкости в газонмерительной бюретке и в уравнительной трубке, следует закрыть кран в уравнительной трубке, а изменение давления наблюдать по менее чувствительному ртутному манометру 11.

При полном растворении пробы нагревание прекращают. Уравнительный сосуд 9 поднимают. Масляную ванну убирают из-под колбы и включают вентилятор. С помощью крана 10 регулируют приток воды к уравнительному сосуду 8, благодаря чему компенсируется изменение объема, вызванное охлаждением. Чтобы быстрее достичь первоначальной температуры, колбы охлаждают в холодной ванне.

После того как в аппарате установится первоначальная температура, а резиновая камера 6 снова будет натянута на формованное изделие 7, жидкость в уравнительной трубке 5 устанавливают на одном уровне с газонмерительной бюреткой 4 и по ее делениям определяют дополнительный объем, который соответствует высвободившемуся количеству газа при данных температуре и давлении.

При пробах с большим газосодержанием объема газонмерительной бюретки оказывается недостаточно, чтобы вместить весь выделившийся газ. В этом случае в газонмерительную бюретку путем регулирования краном 10 впускают такое количество газа, которое можно измерить, устанавливают жидкость в уравнительной трубке на одном уровне с газонмерительной бюреткой и снимают показания. Затем открывают кран 3 и поднимают трубку уровня для того, чтобы довести уровень затворной жидкости до первоначальной отметки. Закрывают вентиляционный кран и измеряют объем оставшегося газа.

Если температура в помещении в начале и в конце опыта различна, вычисляют изменение «мертвого» объема колбы и сосуда для растворения и корректируют снятые показания объема. Если температура насыщенного рассола в колбе до и после опыта различается более чем на 0,3°С, то кроме температурной поправки вносят поправку на изменение давления пара.

Формула Фюота, Саксона и Диксона для расчета давления водяного пара над насыщенным раствором поваренной соли имеет вид

$$\lg P_{\text{H}_2\text{O}} = - \frac{2890,7}{T} - 4,715 \lg T + 22,612, \quad (1)$$

где T — температура в аппарате, К.

Подсчитанное по этой формуле давление водяного пара при температуре 15°С составляет примерно 10 мм рт. ст., а в интер-

вале температур от 15 до 25°С оно изменяется на 0,8 мм рт. ст. на каждый градус. При «мертвом» объеме аппарата 300 мл изменение температуры растворителя на 1°С из-за изменения давления пара влечет за собой погрешность в 0,4 мл.

Освободившееся (и соответственно исправленное) количество газа пересчитывается с учетом внешних условий по известному уравнению Гей-Люссака — Бойля—Мариотта

$$V_0 = \frac{(P - P') VT_0}{TP_0}, \quad (2)$$

где P — показания барометра, мм рт. ст. (следует учитывать изменение внешнего давления воздуха во время опыта); P' — давление пара насыщенного рассола, мм рт. ст. (здесь можно использовать давление пара насыщенного раствора P_{H_2O} , подсчитанное по формуле (1); V — снятые показания объема; $T_0 = -273,2^\circ\text{C}$; $T = -273,2^\circ\text{C}$ плюс температура в аппаратуре в градусах Цельсия.

Авторы рассмотренного метода [37] применяли его при крупности кусков проб до 35 мм. Наиболее близкие к истинным значения газоносности породы получают при растворении образцов диаметром 30—35 мм и соответствующей длины, отобранных при керновом бурении. В таких пробах потери газа минимальны, тогда как при измельчении пробы они возрастают.

Описанный метод наиболее точный из известных методов. С его помощью была изучена газоносность образцов пород калийных рудников ГДР (табл. 5).

Таблица 5

Бассейн	Состав газов, %					
	N ₂	O ₂	CO ₂	Углеводороды	CO	H ₂
Южный Гарц	20—50	—	До 5	45—75	Следы	Следы
Верра	27—65	7—11	21—65	2—6	—	3
	72,4	15,0	3,3	5,8	—	—

Этот метод позволяет, по-видимому, достаточно точно определить содержание газа в соли. Однако выделяющийся газ смешивается с атмосферным воздухом, находящимся в аппаратуре, поэтому определить точно его состав затруднительно. Кроме того, малая величина пробы не позволяет получить за однократное растворение количество газа, достаточное для изучения его состава.

Метод, разработанный авторами совместно с Н. Ф. Красюком, также основан на выделении газов из образца при его растворении и лишен указанных недостатков. Установка (рис. 8) состоит из сосуда 1 для растворения образцов; воронки 2, служащей для сбора выделяющихся пузырьков газа, которые через резиновый шланг 4 и кран-тройник 5 попадают в мерную емкость 6. Ем-

кость 6 имеет двойные стенки и представляет собой сосуд Дюара. В его верхней части устанавливается термометр 7 и ртутный манометр 8 для регистрации температуры и давления газовой смеси во время эксперимента и измерения объема выделившихся газов.

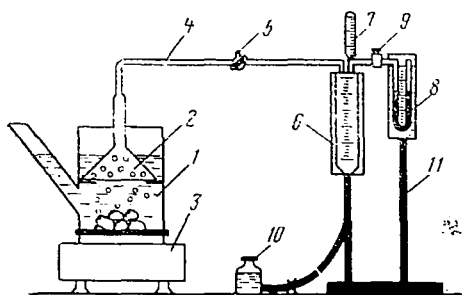


Рис. 8. Схема установки для выделения газа из образцов способом растворения

Нижняя часть емкости соединяется резиновым шлангом с колбой 10. Понижая уровень раствора в колбе, можно перепускать раствор и газ в мерную емкость. Электроплитка 3 служит для подогрева раствора и поддержания заданной температуры во время эксперимента.

Подготовка к эксперименту заключается в следующем. В сосуд 1 заливают 7 л воды, нагревают и кипятят в течение 10—15 мин. При этом происходит частичная дегазация воды. В кипящей воде растворяют 1000—1500 г поваренной соли, благодаря чему достигается дополнительная дегазация раствора.

Приготовленным горячим водным раствором NaCl, находящимся в сосуде 1, наполняют колбу 10. Затем наполняют раствором мерную емкость 6, для чего кран 5 поворачивают так, чтобы мерная емкость соединилась с атмосферой, и поднимают колбу 7 выше мерной емкости. Когда уровень раствора поднимется до крана 5, его поворачивают, опускают воронку 2 в сосуд 1. При этом часть воздуха из-под воронки выходит в атмосферу. Оставшийся под воронкой воздух перепускают в мерную емкость, для чего кран 5 поворачивают в рабочее положение, опускают колбу 10 ниже мерной емкости и убирают пружинный зажим на резиновом шланге, соединяющем колбу с мерной емкостью. При наполнении колбы 10 раствором его переливают в сосуд 1. Эту операцию повторяют несколько раз для заполнения всей системы раствором и установления в системе одинаковой заданной температуры. Температура раствора при этом равна 75°С. Воздух, оказавшийся в мерной емкости, выпускают в атмосферу, повернув кран 9 и подняв колбу 10. После вытеснения воздуха кран 9 поворачивают, а мерную емкость соединяют с ртутным манометром.

Через отвод сосуда 1 в раствор опускают исследуемые образцы. Выделяющийся при растворении образцов газ перепускают в мерную емкость. Из мерной емкости газ можно отобрать или в вакуумированную бутылку или в бутылку, заполненную раствором NaCl.

Для точного определения объема выделившихся газов были проведены исследования по установлению факторов, влияющих на объем газов, выделяющихся в мерную емкость. Через насыщенный раствор NaCl при тех же параметрах, при которых растворяли

образцы сильвинита и каменной соли, пропускали газовую смесь, близкую по составу к фактической. Пропуская определенные объемы газа (10, 20, 30 и 40 мл), измеряли объемы газа в мерной емкости, после чего производили химические анализы проб, отобранных до и после эксперимента. Экспериментальные данные приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Объем газа	Объем пропускаемого газа V_1 , мл				
	10	20	30	40	50
Теоретический, подсчитанный по уравнению (4), мл	12,6	25,0	37,5	50,0	62,5
Замеренный в мерной емкости V_2 , мл	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0

Таблица 7

Время замера	Состав и содержание компонентов газовой смеси, % объемн.							
	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
До эксперимента	2,848	21,307	42,732	0,587	20,409	9,655	0,866	1,595
После эксперимента	4,174	26,221	40,664	1,186	17,567	8,252	0,643	1,259

По этим данным построены графики (рис. 9). Прямая 1 (теоретическая) построена по уравнениям объединенного газового закона для идеальных газов:

$$\left. \begin{aligned} P_1 V_1 &= T_1; \\ P_2 V_2' &= T_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

откуда

$$V_2' = \frac{P_1 V_1 T_2}{P_2 T_1}, \quad (4)$$

где P_1 и P_2 — соответственно атмосферное давление и давление газа в мерной емкости, мм рт. ст.; V_1 и V_2' — соответственно объем пропускаемого через раствор газа и теоретический объем газа в мерной емкости, мл; T_1 и T_2 — соответственно температура окружающей среды и газа в мерной емкости, К.

Прямая 2 построена по экспериментальным данным и выражает зависимость замеренного объема газа в мерной емкости V_2 от

объема V_1 , пропускаемого через раствор газа. Как видно из рис. 9, объемы V_2' и V_2 не равны: $V_2 > V_2'$. Это можно объяснить наличием воздуха в смеси паров раствора, выделившегося из раствора при пропускании газовой смеси. Так, при пропускании 40 мл газовой смеси объем $V_2 = 80$ мл, а по уравнению (4) $V_2' = 49,97$ мл. Давление паров раствора NaCl при концентрации 22,5% вес. при $t = 75^\circ\text{C}$ составит 241 мм рт. ст. Тогда объем паров

$$V_{\text{пар}} = \frac{V_2 P_{\text{пар}}}{P_1 - \Delta P} = \frac{80 \cdot 241}{743 - 34} = 27,20 \text{ мл},$$

где ΔP — показания манометра, мм рт. ст.

Если бы газ был идеальным, то объем его в мерной емкости с учетом паров раствора составил бы $49,97 + 27,20 = 77,17$ мл. Замеренный объем равен 80 мл.

Таким образом, действительное содержание газа в образцах можно определить по графикам, приведенным на рис. 9. При этом должны строго соблюдаться параметры $\frac{P_2}{P_1}$ и $\frac{T_2}{T_1}$: Если это ус-

ловие не соблюдается, тогда из замеренного объема нужно вычесть объем паров, а оставшийся объем по уравнению (4) привести к шахтным или к нормальным условиям ($t = 18 \div 20^\circ\text{C}$ и $P_1 = 760$ мм рт. ст.). Точность измерения объемов составляет $\frac{80 - 77,17}{80} \cdot 100 = 3,5\%$, что вполне достаточно.

Для изучения газоносности целесообразно отбирать образцы породы из свежее обнаженного массива выбуриванием кернов.

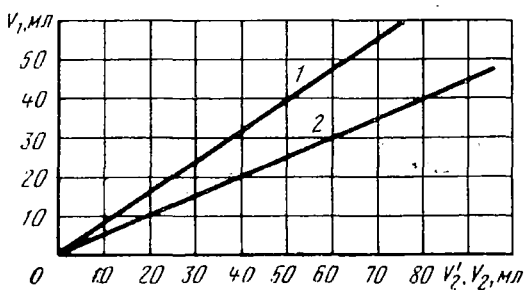


Рис. 9. График для определения действительного содержания газа в образце

Глубина отбора керна должна выбираться из условия максимального сохранения первоначальной прочности породы. При комбайновом способе выемки она может быть небольшой — 10—20 см от поверхности, при буровзрывном — 50 см и более.

При соответствующем оборудовании (колонковом сверле и правильно изготовленном керноотборнике) время выбуривания керна составляет несколько минут. За это время дегазация образца будет ничтожной. Образцы сразу после их выбуривания парафинируют с целью предотвращения дегазации.

Основные требования к образцам пород при изучении их газоносности состоят в следующем: образцы должны сохранять первоначальную прочность; желательно, чтобы образцы были воз-

можно больших размеров; извлечение газа должно производиться сразу после отбора образцов.

Газ, выделяющийся при растворении образцов, состоит не только из микровключенного, но и из связанного и свободного газа изолированных пор и трещин, а образец до его растворения теряет часть свободного газа, находившегося в открытых порах.

Микровключенный газ можно получить только при растворении единичных кристаллов, полученных из породы без нарушения их целостности. Такого разрушения породы можно достичь при немеханическом дроблении соли. Для проверки этого предположения нами было произведено термическое дробление сильвинитовой руды при участии Н. Ф. Красюка (ППИ). При нагревании образца сильвинита до 500°C он разрушался на отдельные кристаллы и мономинеральные сростки нескольких кристаллов. Растворение отдельных кристаллов показало, что газоносность их значительно меньше, чем образца данной породы.

Таким образом, газоносность свежего образца наиболее полно характеризует газоносность данного участка породы. Однако, как уже указывалось, часть свободного газа теряется при выбуривании образца. Поэтому газоносность породы может быть определена как сумма объемов газа, выделившегося из образца до его растворения и при растворении. Объем газа, выделившегося из образца при его отборе из массива, должен определяться путем замеров в шахтных условиях (см. главу III).

§ 3. Газоносность соляных пород

Вопросам газоносности Верхнекамского месторождения посвящены работы многих исследователей. Наиболее полные данные по составу, количественному содержанию газов в солях и газо-выделениям приведены в трудах Ю. В. Морачевского, А. А. Черепенникова, М. В. Фивега, З. Н. Несмеловой, А. Н. Дудырева, К. В. Кочнева, Т. К. Ефремовой, В. П. Шатова [8, 16, 28].

Связанные газы наиболее полно изучены Ю. М. Морачевским и А. А. Черепенниковым по Соликамскому участку, З. Н. Несмеловой — по шахтному полю Первого Березниковского рудника. Авторами данной книги при участии Н. Ф. Красюка и В. Ф. Коротаева изучались связанные газы рабочих пластов 2БКР, при участии Н. Ф. Красюка — газы пластов Индерского месторождения, Х. М. Александровичем, С. М. Павлюченко, А. Д. Маркиным исследовались связанные газы пластов Старобинского месторождения [1].

Ю. В. Морачевским и А. А. Черепенниковым установлено, что количество и состав связанных газов весьма сильно изменяются по разрезу продуктивной толщи. Наибольшее количество газа содержится в пестрых сильвинитах пластов Б, В, Г (от 90 до 171 мл/кг), особенно в молочно-белом сильвине (до 210 мл/кг). Полосчатый и красный сильвинит занимают промежуточное поло-

жение между карналлитом и пестрым сильвинитом и содержат газ соответственно до 87 и 47 мл/кг. Во всех пластах наблюдается некоторое увеличение содержания газа в верхних слоях по сравнению с нижними. По данным этих авторов, в состав связанных газов входит азот, водород, метан, углекислый газ, а также в очень малых количествах аргон, гелий, неон и другие редкие газы. Основной составляющей этих газов является азот, содержание которого в 1 кг калиевой соли достигает 195 мл (в пестрых сильвинитах до 80%); в карналлите азота содержится в 10 раз меньше. Количество углекислого газа в отдельных слоях сильвинита резко колеблется (от 1 до 20 мл/кг), а в карналлите его содержится очень мало (около 1 мл/кг).

Состав газов и средние данные по его содержанию в образцах соли приведены в табл. 8.

Данные по газоносности пород Второго Березниковского и Индерского рудников получены по вышеописанной методике.

Основные составляющие свободных газов Верхнекамского месторождения — водород, метан, азот. В небольших количествах в свободных газах присутствуют тяжелые углеводороды, углекислый газ и сероводород. В соотношении компонентов свободного газа наблюдаются колебания в широких пределах не только для различных пластов, но и в пределах одного пласта. При этом относительно меньше колебаний в отношении суммы горючих газов (метана и водорода) к азоту. Значительно шире пределы колебания отношения водорода к метану. Для карналлитового пласта *В* Соликамского рудника это отношение изменяется от 1 до 15.

Резкое преобладание водорода над метаном характерно для участков увеличенной мощности шестого слоя пласта *В*. Сумма водорода и метана на таких участках может составлять от 50 до 90% объема свободных газов. При этом смесь оказывается обогащенной углекислым газом. Такая особенность может быть объяснена раздробленностью кристаллов на этих участках пласта и выделением в свободную форму внутрикристаллических газов. В среднем в состав газов кроме водорода и метана входит и азот (38—48% по объему), имеется незначительное количество тяжелых углеводородов (этана, пропана, бутана в сумме от 1 до 3%) и углекислого газа (около 0,33%).

В газах сильвинитового пласта *АВ* соотношение между составляющими смеси весьма различны, но в большинстве случаев метана содержится больше, чем водорода: в среднем на долю водорода приходится всего 1,18%, а метана 47,15%. Тяжелых углеводородов содержится 7,6%. Почти половина — 43,7% приходится на долю азота и инертных газов. В незначительном количестве содержится углекислый газ — 0,34%.

Свободные газы сильвинитовых пластов Красного I, II, III состоят в основном из углеводородов (метана, этана и др.) и инертных газов; встречаются только следы водорода. В отличие от

Рудник	Полезное ископаемое, порода	Количество газа, мл/кг	Состав газа, %					
			H ₂ S	CO ₂	O ₂	H ₂	CH ₄ +углеводороды	N ₂ +инертные газы
Первый Солигорский	Каменная соль	55,2—77,5	5,2—7,6	0,94—1,40	25,8—28,2	7,9—11,7	8,4—12,4	51,6—38,8
	Сильвинит	97,0	7,9	4,5	25,9	4,0	3,4	54,4
Первый Березниковский	Каменная соль	88,6—106,2	0,2—1,5	0,7—2,4	24,4—29,2	2,9—6,7	7,0—13,1	66,4—52,6
	Сильвинит	115,4—121,0	1,0—8,6	2,3—4,8	22,9—25,3	0,9—1,4	2,3—7,6	52,3—70,6
Второй Березниковский	Пласт Красный II	50—230	—	5,96	—	22,9	5,34	65,80
	Пласт А—Б	60—120	Следы	5,65	—	9,17	9,73	83,45
Индерский	Карналлит-кизеритовая порода	9,3—49,5	»	1,80	—	5,51	7,78	85,01
	Каменная соль с карналлитом	10,5—12,8	—	1,90	—	6,03	6,21	85,86
«Зондерс-хаузен» (ГДР)	Каменная соль	5,9—2,8	—	0,56	—	2,53	9,34	87,57
	Сильвинит	9,6—28,4	Следы	0,12	—	5,88	20,22	73,68
	Карналлит	14,0	—	0,1	17,5	—	3,4	79,0
	Галит	8,0	—	0,0	20,4	—	0,3	79,3
	Сильвинит	53,0	—	0,9	14,9	—	1,2	83,0

Рудник	Полезное ископаемое, порода	Средний состав газов, % объема.							
		N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₆ H ₁₂	CO ₂	N ₂ -инертные газы
Соликамский	Карналлит (B)	39,40	11,50	1,05	0,25	0,04	—	0,34	47,50
	Сильвинит (A—B)	1,18	47,15	6,64	0,68	0,21	0,05	0,34	43,74
	Сильвинит (Красный II)	0,64	44,10	13,0	0,80	0,46	0,23	0,46	40,05
Первый Березниковский	Карналлит (B)	19,40	39,20	2,91	0,25	0,04	—	0,33	37,70
	Сильвинит (A—B)	1,18	47,15	6,64	0,68	0,21	0,05	0,34	43,74
	Сильвинит (Красный II)	0,64	44,10	13,0	0,80	0,46	0,23	0,46	40,05
Второй Березниковский*	Сильвинит (Красный II)	0,63	20,55	9,54	0,99	0,67	0,39	He	66,43
	Сильвинит (A—B)	1,02	48,40	4,90	0,82	0,28	0,20	опре- делялся	44,38
	Карналлит-кизеритовая порода	10,50	73,40	1,45	0,35	Следы	Следы	—	14,3
Индерский	Каменная соль с карналлитом	4,21	85,59	1,44	0,04	»	»	—	8,72
	Каменная соль	Нет	94,30	4,62	1,08	»	»	—	—
	Сильвинит	»	96,77	2,19	0,94	»	»	—	—
Первый Солигорский	Сильвинит (III калийный горизонт)	0,51	3,55	1,40	0,33	»	»	0,42	89,60

* Состав газов приводится по пробам, наименее разбавленным атмосферным воздухом (с наименьшим содержанием кислорода).

пластов *B* и *АБ*, в красных сильвинитах тяжелых углеводородов содержится в среднем 14,5% по объему.

Состав свободных газов промышленных пластов рудников Верхнекамского, Старобинского и Индерского месторождений приведен в табл. 9.

В свободных газах пластов Старобинского месторождения преимущественно содержатся инертные газы: азот, аргон, гелий и др., а горючие газы в сумме не превышают 10%. Основные составляющие газов Индерского месторождения — горючие, причем из них преобладает метан. Водород присутствует в тех породах, в состав которых входит карналлит. В этих же породах имеется и азот. На Калужском руднике основным компонентом является метан.

Калийные месторождения ГДР характеризуются неодинаковым составом газов (см. табл. 5) [37]. Природный газ, выделяющийся на рудниках бассейнов Верра и Фульда, состоит в основном из углекислого газа (в некоторых случаях до 99%). В природных газах Южного Гарца и Нижней Саксонии содержатся в основном углеводороды с преобладанием метана (до 80%).

Кроме газов, содержащихся в самих пластах (внутрипластовые), в массиве имеются и приконтактные скопления газов. Внутрипластовые газы могут содержаться в порах породы и образовывать гнездовые скопления. Количество поровых газов зависит от пористости породы. Наибольшую пористость и трещиноватость имеет карналлит, значительно меньшую — сильвинит. Содержание внутрикристаллических и поровых газов определяет среднюю газоносность калийных солей. На Верхнекамском месторождении наибольшая газоносность наблюдается у карналлита, далее по степени убывания — у сильвинитов и каменной соли.

Газоносность пластов по мощности также неодинакова. Около кровли горных выработок газоносность карналлита выражается сотнями литров на 1 м³, пестрого сильвинита — десятками, красного — единицами. Каменная соль, переслаивающая основные эксплуатационные пласты месторождения, имеет также различную газоносность. Верхние пласты каменной соли содержат больше газа (до 35 л/м³), чем нижние.

Гнездовые скопления газов — это заполненные газом полости внутри пласта. Газ в полостях находится под высоким давлением. Так, по нашим данным, давление газа в карналлитовом пласте *B* Соликамского рудника составляет 83 кгс/см². Гнездовые скопления газов встречаются во всех рабочих пластах. Наибольшее число их в карналлите, меньше в пласте *АБ* и незначительное количество в пласте Красном II. Вскрытие полостей приводит к кратковременным суфлярным выделениям газа. Такие явления постоянно наблюдаются на Верхнекамских рудниках. При вскрытии мелких суфляров шлурами отмечаются толчки газа, выбросы бурового штыба из шпура. Такие же явления неоднократно отмечены на Индерском руднике. Наиболее крупные суфлярные выделения происходят из трещин в каменной соли.

На руднике «Томас Мюнцер» (ГДР) только за один месяц при бурении шпуров по карналлиту было зарегистрировано 305 мелких суфляров. Газ выделялся из полостей диаметром 0,1—0,3 м. Иногда встречаются более крупные полости — объемом до 10 м³. Расположение их в пласте не подчиняется какой-либо закономерности. Стенки полостей обычно гладкие.

Приконтактные газы близки по типу к гнездовым. Они приурочены только к контактам кровли калийных пластов с каменной солью или с глинистыми прослоями. В последнем случае их называют коржевыми. На Верхнекамском месторождении коржевые газы чаще всего находятся на контакте шестого слоя карналлитового пласта В и каменной соли В—Г, точнее, у глинистого прослоя на этом контакте. Однако коржевые газы, так же как и гнездовые, встречаются и при разработке силвинитовых пластов.

На Старобинском и Калушском месторождениях приконтактные газы являются главным источником газовыделений. Они приурочены к подстилающим калийные пласты интенсивно рассланцованным глинистым породам.

На рудниках Южного Гарца приконтактные газы приурочены к контактам карналлита и каменной соли, на рудниках бассейна Верра — к контактам силвинита и карналлита, силвинита и хартзальца. Эти скопления газов при ведении горных работ выделяются также в виде суфляров.

Крупные скопления газа на рудниках Советского Союза встречаются довольно редко — в основном на Верхнекамском и Индерском месторождениях. Они обычно находятся в больших трещинах или полостях, например в зонах разлома на участках резких перегибов пласта синклинального и антиклинального типа, связанных с микротектоникой пластов. По нашим наблюдениям, на Соликамском калийном руднике скопления горючих газов в карналлитовом пласте характеризуются следующими объемами: гнездовые — до 40 м³, коржевые — до 450 м³, крупные скопления газов в микроантиклиналях — до 2000 м³.

На рудниках ГДР и ФРГ крупные скопления газа встречаются чаще и объемы их значительно больше, чем на рудниках СССР, что объясняется различием и особенностями генезиса газов. Например, на рудниках бассейна Верра при бурении шпуров зарегистрированы суфлярные выделения газа, объем которых достигает сотен тысяч кубических метров.

В районе Южного Гарца (рудники «Нейблейхерода», «Фолькенрода», «Петен», «Глюкауф», «Зондерсхаузен») крупные газовые скопления находятся в полостях, соединяющих толщу с нефтеносными породами лежащего бока (основным доломитом и ангидритом). На рудниках «Фолькенрода» и «Петен», имеющих большую глубину, вследствие большого горного давления подстилающие породы настолько сильно разрушаются, что образуются трещины до нефтеносного доломита, по которым в горные разработки поступают нефть и газы.

Глава III

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

§ 1. Виды газовыделений

В калийных рудниках, так же как и в угольных шахтах, наблюдаются три вида газовыделений в горные выработки:

обычное — медленное непрерывное газовыделение из мелких трещин и пор породы;

суфлярное — местное повышенное газовыделение из трещин и всякого рода пустот, вскрытых горными выработками, в подавляющем большинстве случаев кратковременное (от нескольких минут до нескольких часов);

внезапное — местное выделение большего по сравнению с обычным количества газа с одновременным разрушением части приконтурного массива, а иногда и смещением его (обрушением, вывалом, выбросом породы).

Обычные газовыделения незначительны и поэтому не оказывают существенного влияния на ведение горных работ в калийных рудниках. Такой вид газовыделений обусловлен не только особенностями газоносности соляных пород по сравнению с угольными, но и их некоторыми физико-механическими свойствами и технологией разработки (системой разработки, способом отбойки руды и связанным с ними характером проявления горного давления в очистных и подготовительных выработках).

Обычная (средняя) газоносность калийных пластов невелика и составляет десятые доли кубических метров газа на кубический метр породы в отличие от угольных, газоносность которых может достигать десятков кубических метров газа на 1 т угля. Эффективная пористость соляных пород, в особенности сильвинитов и каменной соли, очень невелика, а газопроницаемость весьма мала, тогда как для угольных пластов характерна более высокая пористость (несколько процентов) и значительно более высокая газопроницаемость.

Относительно спокойный характер проявления горного давления на калийных пластах объясняется применением камерных

систем разработки, тогда как на угольных пластах, разрабатываемых системами с длинными очистными забоями, он более интенсивен. В связи с частичным разрушением угля в призабойной части массива под действием горного давления создаются благоприятные условия для его дегазации. Газопроницаемость соляных руд в призабойных участках массива повышается незначительно. Увеличение газопроницаемости больше при отбойке руды взрывным способом, чем при комбайновом.

Обычные газовыделения характеризуются небольшими объемами и не приводят к повышению концентрации горючих газов выше допустимых норм.

В угольных шахтах выделяется преимущественно метан. Примесью метана чаще всего бывает углекислый газ. Водород вместе с метаном выделяется сравнительно редко, причем содержание его в рудничной атмосфере угольных шахт вместе с гомологами метана не превышает 1—4%. На некоторых калийных рудниках водород выделяется так же часто, как и метан. Так, на Соликамском руднике Верхнекамского месторождения выделяется в основном водород. На зарубежных калийных рудниках (бассейн Верра) в рудничную атмосферу выделяется в основном углекислый газ.

Максимальная газопроницаемость соляных пород связана с контактами различных по минеральному составу слоев и прослоев, а в пределах их — с местами включений минералов, значительно отличающихся по своему составу от солей. Миграция природных газов из одного пласта в другой в нетронутым массиве и в период разработки практически отсутствует. Отсутствует также миграция газа из глубин массива. Незначительный подток газа может осуществляться из трещин, вскрытых горными выработками, и по контактам солей с глинистыми прослоями. Из массива в горные выработки выделяется в основном свободный газ из соединенных между собой пор; газы, заключенные в закрытых порах и кристаллах, в этих случаях не выделяются. Сорбированный газ выделяется, по-видимому, в незначительных количествах (вопрос о содержании в солях и выделении сорбированного газа недостаточно изучен).

При разработке сближенных угольных пластов в горные выработки пласта, отрабатываемого в первую очередь, может происходить выделение газа из смежных пластов.

При разработке одной шахтой нескольких калийных пластов газовыделений в горные выработки из смежных пластов не наблюдается, что объясняется, с одной стороны, применяемой системой разработки, а с другой — физико-механическими свойствами солей и их газоносностью. Наблюдения за газоотдачей наиболее газоносного карналлитового пласта В Верхнекамского месторождения показали, что даже в начальный момент после обнажения массива газовыделение не превышает 60 л/м² в сутки [14]. Это в десятки и сотни раз меньше газоотдачи со свежееобнаженного угольного пласта.

Характер изменения газовыделения из обнаженного массива карналлитового пласта В, отрабатываемого буровзрывным способом, во времени показан на рис. 10. Наиболее интенсивно газ выделяется из массива в первые дни после его обнажения и на первый месяц приходится около 80% всего объема выделяющегося газа. После этого газовыделения составляют незначительную величину — $3 \cdot 10^{-5}$ л/м² в 1 ч. Глубина дренированной зоны колеблется от 1 до 5 м. Период дегазации поверхностного участка массива составляет 3—5 месяцев.

Газовыделение из сальвинитового пласта Красного II в выработки, проводимые комбайнами, практически заканчивается через 5—7 дней [22].

На калийных рудниках в отличие от угольных шахт газовыделения из выработанного пространства незначительны. Многочисленные наблюдения в течение более 30 лет за составом рудничной атмосферы отработанных камер Соликамского калийного рудника показали, что горючие газы либо отсутствуют, либо их содержание не превышает сотых долей процента.

По данным П. И. Пономарева и В. П. Шатова, проводивших обследование атмосферы старых камер, с момента отработки которых прошло от 1 до 5 лет и проветривание не производилось, содержание горючих газов составляло от 0,001 до 0,002%, углекислого газа — от 0,0 до 0,30%, азота — от 78,5 до 79,8%, кислорода — от 20,1 до 20,8 [28].

Тем не менее не исключены случаи значительных газовыделений в выработанных пространствах на калийных рудниках. Они, в частности, могут быть вызваны деформацией и разрушением междукammerных целиков и потолочин в отработанных камерах. Такие случаи были на Соликамском руднике. На рудниках Южного Гарца подобные проявления значительны и неоднократно служили причиной газовыделений в выработанном пространстве.

Суфлярные выделения связаны со скоплениями свободного газа, который заполняет относительно крупные полости в соляном массиве и находится под давлением. Они происходят при вскрытии этих пустот шпурами, скважинами, горными выработками или трещинами. В этих случаях газ, как правило, выделяется интенсивно. Продолжительность газовыделения зависит от объема газового скопления и размеров путей, по которым выходит газ.

В отличие от угольных шахт, где продолжительность действия суфляров измеряется в основном несколькими часами или сутками, суфлярные выделения на калийных рудниках кратковременны

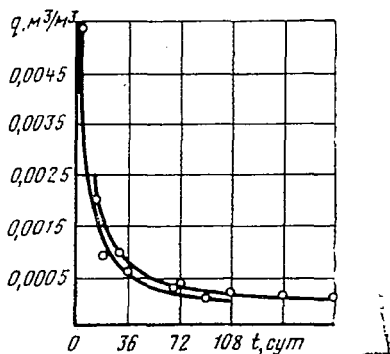


Рис. 10. График зависимости газовыделения из массива карналлитового пласта В от времени

и продолжительность их действия в большинстве случаев составляет минуты, реже часы. Вместе с тем, так же как и в угольных шахтах, известны суфляры, действовавшие длительное время, иногда годы.

На Верхнекамских рудниках суфляры приурочены как к карналлитовому, так и к сильвинитовым пластам. При разработке карналлитового пласта на Соликамском руднике в отдельные месяцы было зарегистрировано до 177 случаев суфлярных выделений. Продолжительность действия большинства из них составляла от нескольких секунд до 30 мин. Объем выделившегося газа был, как правило, невелик. Силу таких небольших суфляров работники рудника определяют по звуку: хлопку, подобному выстрелу из ружья; звуку, напоминающему разрыв шланга со сжатым воздухом, и т. п. Рабочие отмечают ощущение холода, вызванное расширением газов.

А. А. Черепенников считал, что давление, под которым находится газ, теоретически может достигать 40—50 кгс/см². Суфляры, наблюдаемые В. П. Шатовым, действовали в течение 1—3 ч, при этом выделялось до 0,015 м³ газа. Нами была отмечена продолжительность действия суфляров около 30 ч на Втором Березниковском руднике и около 48 ч на Индерском месторождении. Максимальный объем выделившегося газа составил 60 м³.

Суфлярные выделения из пластов А—Б и Красного II отмечены реже, чем из пласта В. Однако чаще, чем обычно, они происходят на участках шахтного поля со значительным развитием пустот. Такие участки на Первом Березниковском руднике были отмечены на 4-й и 5-й восточных панелях, приуроченных к сводовой части, и на 2-й восточной панели, приуроченной к сводовой части Березниковской брахиантиклинальной структуры [7]. Первые пустоты представляли собой открытые трещины длиной до 5 м и шириной 6—8 см.

При вскрытии суфлярных скоплений газа шпурами или скважинами отмечают толчки газа, выбросы штыба, а иногда и выбросы бурового инструмента. Так, на Соликамском руднике при бурении разведочной скважины длиной 193,5 м из забоя квершлага было вскрыто крупное скопление газа на контакте пластов А и Б. Буровой станок весом 750 кг был выбит и перемещен на 3 м, а буровые штанги длиной 160 м и диаметром 42 мм были выброшены из скважины, перемяты, закручены в кольца и в некоторых местах порваны. Иногда происходили кратковременные повышения концентрации горючих газов в районе бурения, а при проведении выработок комбайнами — в забое выработок.

Нередко суфлярные выделения газов происходят при бурении скважин с поверхности. По сведениям А. А. Иванова и В. И. Рейнеке, из 28 скважин, пробуренных через толщу калийных солей Верхнекамского месторождения, в 17 скважинах наблюдались выделения газов различной силы и продолжительности. При бурении одной из скважин выделение газа с глубины около 150 м

сопровождалось выбросом всего столба промывочной жидкости и бурового инструмента на высоту более 10 м, при этом газ загорелся от пламени керосинового фонаря. Выделения газа отмечаются при бурении скважин с поверхности на Индерском калийном месторождении Казахской ССР. Одна из скважин вскрыла, по-видимому, очень большой суфляр, так как газовыделение продолжается уже в течение нескольких лет. Этот суфляр можно назвать небольшой газовой залежью.

На Индерском месторождении при проведении подземных горных выработок по каменной соли суфлярные выделения газа происходят довольно часто. Сила одного из суфляров была настолько велика, что произошел выброс бурового инструмента из разведочной скважины длиной 80 м.

Суфлярные выделения газов на калийных рудниках ГДР и ФРГ во многих случаях отличаются большим дебитом и продолжительностью действия [29, 33, 38, 39]. На отдельных рудниках («Томас Мюнцер») число суфлярных выделений в месяц достигает 300 и более. Наиболее сильные выделения газов на рудниках Южного Гарца и Верры происходят при вскрытии тектонических трещин, а также по трещинам, образующимся в результате проявлений горного давления. Последние приурочены к основному доломиту и ангидриту (Южный Гарц) или к базальтовым жилам (Верра). Так, на руднике «Зольштедт-Края» при проведении разведочного штрека был вскрыт суфляр, связанный с тектоническими трещинами в соляном куполе, который действовал в течение четырех лет. На руднике «Томас Мюнцер» выделение газа из скважины продолжалось в течение 5 лет. В отдельных случаях суфлярные выделения газа на рудниках Верры составляют 10^5 м³ [29]. Подобные крупные суфлярные выделения нередко служили причиной гибели людей.

Внезапные выделения газа, как уже отмечалось, сопровождаются одновременным разрушением части массива и смещением ее в виде обрушения, вывала или выброса породы. На калийных рудниках наблюдаются два вида внезапного выделения газа: внезапные обрушения соли с выделением газа и внезапные выбросы соли и газа.

Внезапные обрушения соли с выделением газа часто происходят на глубоких рудниках Южного Гарца («Фолькенрода», «Петен», «Глюкауф», «Зольштедт-Края» и др.) и бывают на Верхнекамских и Солигорских рудниках.

Крупные масштабы обрушений на упомянутых рудниках ГДР и сравнительно большое их число объясняются Либшером как проявление «больших тектонических сдвигов, гигантских естественных процессов». Однако большинство исследователей (Г. Шпакелер, А. Баар и др.) считают эти процессы следствием проявления горного давления, вызываемого ведением горных работ.

По мере подвигания очистных работ от центра шахтного поля к флангам напряжения, возникающие в породах кровли разраба-

тываемых пластов, вызывают пластические деформации каменной соли в сторону выработанного пространства. В результате сдвижений в пласте каменной соли возникает система трещин, по которым газ, скопившийся в основном доломите, может попасть в выработанное и рабочее пространство. По мере подвигания горных работ возникают прогибы в ангидрите и происходят внезапные обрушения соли с выделением газа. В случае крупных обрушений динамический эффект, вызываемый мгновенным сдвижением пород, настолько силен, что выработки подвергаются сотрясениям в виде удара продолжительностью от долей секунды до нескольких секунд, причем на поверхности эти сотрясения воспринимаются как землетрясение.

Такие внезапные обрушения на рудниках ГДР до недавнего времени неправильно квалифицировали как горные удары. Однако в более поздних трудах В. Гимма и Г. Пфорра было доказано различие этих явлений [36]. Так, при горных ударах кровля не обрушается, а происходит мгновенное разрушение междукамерных целиков. Различен и характер разрушения пород в том и другом случае. При горном ударе порода оказывается раздробленной. Обрушение кровли происходит за счет образования трещин в породах кровли, мелкого дробления породы не наблюдается.

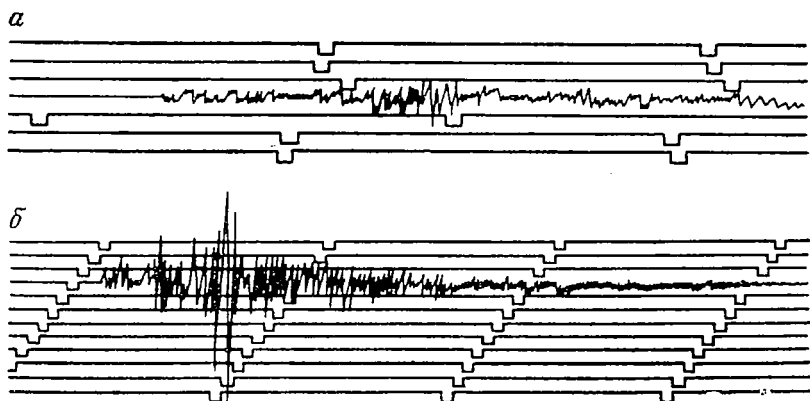


Рис. 11. Сейсмограммы:
а — обрушения; б — горного удара

Существенно различие и в характере, и в величине выделяющейся при обоих явлениях энергии. Так, по данным сейсмической станции г. Иены (ГДР), зарегистрировавшей сотрясения пород при обрушении кровли (хартзальца) и горном ударе (разрушение карналлитовых целиков), обрушение кровли происходит постепенно и равномерно. Сейсмограмма даже сравнительно слабого горного удара показывает внезапное нарастание и затухание амплитуды сотрясения пород (рис. 11). Процесс разрушения при горном

ударе характеризуется малой продолжительностью и высвобождением большого количества энергии.

Существенно также, что горный удар происходит только в породах, содержащих карналлит. Обрушаться могут различные породы, находящиеся в кровле (сильвинит, хартзальц, соленосная глина).

Так, на руднике «Глюкауф» в отработанной камере обрушилось 1000 м³ соли, а выделившийся при этом газ заполнил камеру и вышел на штрек, где, воспламенившись от карбидной лампы, взорвался. Несколько рабочих, находившихся в штреке, получили тяжелые ожоги.

На руднике «Зольштедт-Края» в шести старых незаложенных отработанных камерах произошло внезапное обрушение кровли с поверхности с выделением метана. По данным Центрального научно-исследовательского института по изучению землетрясений в г. Иене это обрушение было зарегистрировано сейсмографами как землетрясение. На рудниках «Фолькенрода» и «Петен» было зафиксировано 10 внезапных обрушений, из них 5 довольно сильных.

На Соликамском руднике внезапные обрушения карналлита были особенно распространены тогда, когда отказались от почвуступной выемки карналлита отбойными молотками и перешли к послойной выемке его снизу вверх с помощью буровзрывных работ. Одновременно с обрушением карналлита выделялся газ, объем которого колебался в широких пределах. Случаи загазирования участков (рабочих камер и прилегающих к ним выработок) были довольно редкими. Наиболее крупные обрушения связаны с зонами разрыва покровной каменной соли пласта В—Г и захватывают породы кровли.

Одно из таких крупных обрушений с выделением газа произошло в камере шестого слоя карналлитового пласта В на Соликамском руднике. Обрушение сопровождалось сильным шумом и сотрясением воздуха. Работа в камере велась потолкоуступным забоем. Вначале камера была рассечена выработкой шириной 4 и высотой 2 м по нижнему слою. Обрушившейся породой камера была завалена на 70 м. Участок был полностью загазирован. Размеры обрушения составили: по длине камеры 45, по ширине 8 и по высоте 5—13 м. В кровле после оборки были обнаружены трещины двух типов: зияющие с кристаллами на стенках и заполненные карналлитом. Однако характер разрушения породы (пластинчатый, чешуйчатый и пылеобразный) позволяет предположить, что в данном случае имело место не чистое обрушение, а внезапный выброс карналлита и газа с обрушением пород непосредственной кровли.

На Старобинском месторождении на Первом Солигорском калийном руднике из 54 зарегистрированных газопроявлений 40 сопровождалось обрушением кровли. Большая часть этих явлений наблюдалась в подготовительных выработках, проводимых комбайнами. Обрушения произошли на различных расстояниях от

забоя — от 3 до 100 м. Количество обрушившейся породы колебалось от 0,064 до 360 т. Наиболее крупные обрушения произошли в рабочих камерах. Форма полостей, образовавшихся после обрушений породы из кровли, — во всех случаях усеченный конус, эллиптический в основании. Высота полостей 0,1—2 м. В семи случаях работниками рудника было зафиксировано ясно слышимое потрескивание, предшествующее обрушению [23].

Причиной обрушений работники рудника считают скопление газов на контактах с глинистыми прослоями. Поэтому для предупреждения этих явлений начали применять дренажное бурение. В кровле камеры бурили дренажные шпуров по сетке $0,7 \times 2,0$ м или $0,7 \times 1,5$ м. При этом визуально было замечено, что шпуров с газовыделениями чередовались со шпуров без выделения газа. Из 50—60 шпуров, пробуренных в камере, газовыделение фиксировалось в 20—23. Это свидетельствует о неравномерности распределения газовых скоплений и о незначительной площади, занимаемой одним скоплением. Кратковременность газовыделений (не более 10 мин) указывает на незначительный объем газовых скоплений.

Обрушения пород кровли чаще всего происходили на участках распространения тектонических трещин, заполненных в основном карналлитом, к которым приурочено большое количество газовых скоплений. Анализ показывает, что наиболее благоприятные условия для обрушения создаются при подрубке в кровле одного из слоев каменной соли (III—IV, IV—V или V—VI) толщиной 15—30 см или совпадении кровли выработки с контактом сильвинита и соли. Внезапные обрушения кровли наблюдаются и при разработке сильвинитовых пластов Красного II и А—Б на Втором Березниковском калийном руднике. За четыре года с начала ведения горных работ на руднике произошло около 50 обрушений и выбросов породы из кровли и почвы выработок.

Наблюдения за газодинамическими явлениями в горных выработках показали, что из 43 зафиксированных до июля 1972 г. случаев 24 произошли в выработках пласта А—Б, 17 — пласта Красного II и 2 в уклоне, проходимом в междупластье. Анализ позволил выделить среди этих явлений выбросы и обрушения и разделить их по наиболее общим внешним признакам на отдельные группы.

Первая группа — самые крупные обрушения и выбросы, которые произошли в выработках, пройденных двумя ходами комбайнов ПК-8 или «Қараганда-7/15». В этих выработках визуально отмечались признаки интенсивного проявления горного давления: выдавливание глинистых прослоев из целика, его растрескивание по вертикальным плоскостям, параллельным поверхности обнажения. Одно из таких обрушений, например, произошло в двухходовой выработке (два хода комбайна «Қараганда-7/15») при уменьшении размера междукамерного целика до 0,3 м против 1,4 м по проекту (рис. 12). Обрушение захватило оставшийся в кровле

первый слой пласта Красного II, пласты Красный I — Красный II, Красный I и на 0,4 м — пласт А — Красный I. Пролет выработки при разрушенном межходовом целике составил 10,7 м.

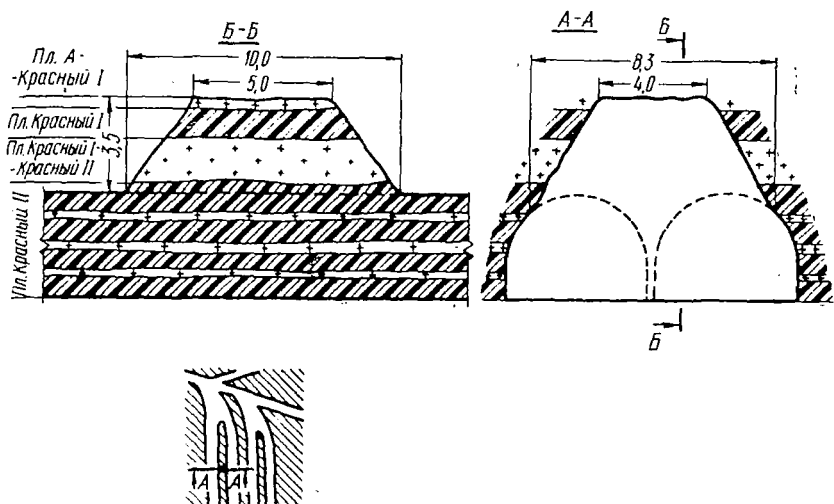


Рис. 12. Зарисовка места обрушения, происшедшего в камере № 31, пройденной двумя ходами комбайна «Караганда-7/15» по пласту Красному II

К этой группе относятся обрушения, происшедшие в местах сопряжения комбайновых ходов. Например, такое обрушение отмечено в месте сопряжения двух ходов комбайна «Караганда-7/15». Пролет обрушенной зоны составил 9,2 м. Накануне обрушения были замечены признаки интенсивного проявления горного давления — образование в кровле открытых трещин. В обоих случаях пробы воздуха не отбирали. Характер стенок и формы осмотренных полостей свидетельствовал о том, что произошло обрушение породы. Аналогичный описанному случаю обрушения показан на рис. 13.

Вторая группа — обрушения и выбросы, которые произошли в выработках, пройденных одним ходом комбайна ШБМ-2, ПК-8 или «Караганда-7/15». Пример такого обрушения показан на рис. 14. Только в одном случае пробой было зафиксировано выделение газа; в других случаях пробы не были отобраны. Формы полостей свидетельствовали о том, что произошли обрушения. В кровле выработки находились различные слои и пласты. Пробы воздуха отобраны не были, характер разрушения породы и стенок, образовавшихся полостей не описан, поэтому определить, были ли это обрушения или выбросы, затруднительно.

Третья группа — выбросоподобные явления, происходящие из почвы выработок на пласте Красном I. Пример такого выброса,

происшедшего на пласте А — Красном I, показан на рис. 15. В одном случае было отмечено вспучивание породы и ее частичный выброс из-под комбайна, в другом — подъем отдельных плит раз-

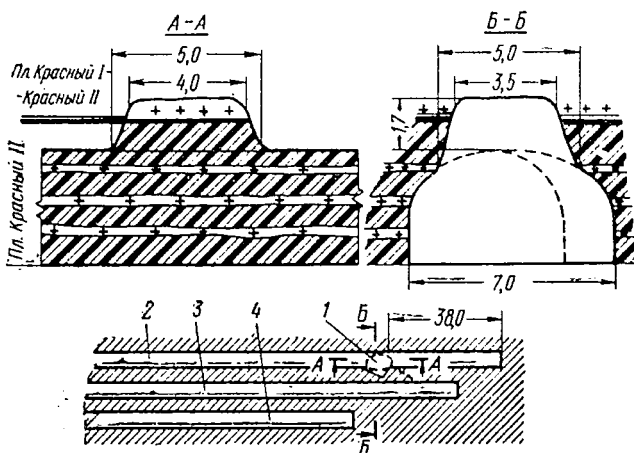


Рис. 13. Зарисовка места обрушения, происшедшего на сопряжении выработок, пройденных по пласту Красному II: 1 — положение полости обрушения в плане; 2, 3, 4 — соответственно левый, центральный и правый ходы 2-го восточного выемочного штрека (в плане)

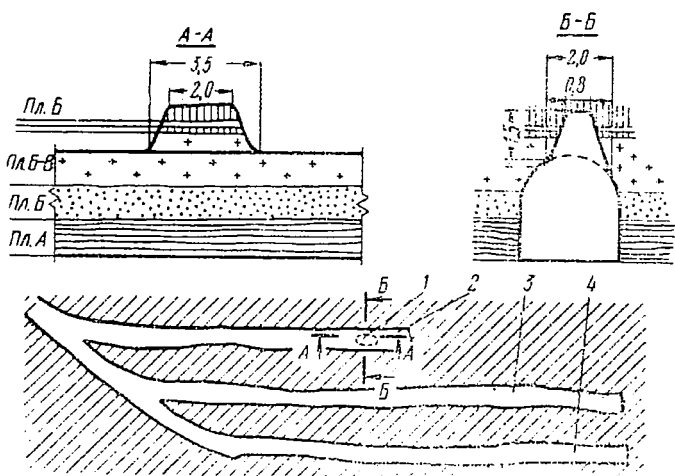


Рис. 14. Зарисовка места обрушения, происшедшего в камере, пройденной комбайном ПК-8 по пласту А—Б:

1 — положение полости обрушения в плане; 2, 3 и 4 — соответственно левый, центральный и правый ходы камеры № 52

мером 1 м и более. Такие плиты по толщине ограничены глинистыми прослоями, поставлены под углом, а часть породы выброшена.

Вентилятор местного проветривания работал непрерывно и в отобранных пробах горючие газы зафиксированы не были. Тем не менее участие газа в этих случаях очевидно. В месте выброса, показанного на рис. 15, вместе с обломками плит каменной соли

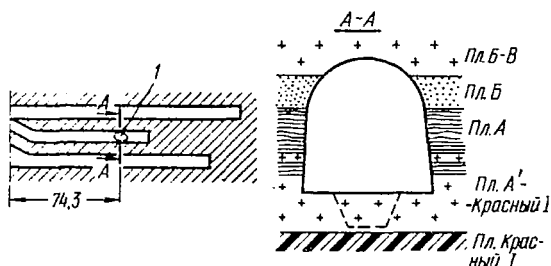


Рис. 15. Зарисовка места выброса породы из почвы среднего хода камеры № 20 3-й восточной панели, пройденной комбайном ПК-8 по пласту А—Б:

1 — место выброса породы в плане

было обнаружено большое количество коржевой глины кровли пласта Красного I.

Анализ вышеописанных динамических явлений позволил выявить общие закономерности, характерные почти для всех случаев.

1. Динамические явления произошли спустя незначительное время после обнажения поверхности массива (от одного часа до нескольких десятков часов).

2. Форма полости почти во всех случаях — усеченный конус, сужающийся кверху (при выбросах из почвы — сужающийся книзу), а в плане — эллипс, вытянутый по длине выработки.

3. Ширина полости всегда меньше ширины пролета выработки.

4. Наиболее крупные обрушения или выбросы произошли при максимальных пролетах выработки (в двухходовых выработках, при уменьшении ширины межходового целика в несколько раз по сравнению с проектной или при отсутствии его).

Другие закономерности не были выявлены, так как разрушение захватило различные слои и пласты пород (от Красного II до Г включительно). Объем выброшенной или обрушенной породы колебался в широких пределах: от долей кубических метров до 250 м³. Рассмотренные явления распространены по всему шахтному полю и отмечались при работе всех комбайнов, применяемых на руднике.

На первой стадии исследования изучалась газоносность пород, проводились визуальные наблюдения за состоянием выработок, изучались физико-механические свойства пород Второго Березниковского рудника. Кроме того, была сделана попытка теоретиче-

ской оценки роли фактора горного давления в рассмотренных динамических явлениях

При рассмотрении напряженного состояния массива вокруг одиночной выработки, важно в первую очередь определить соотношение величин вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления (коэффициент бокового распора λ) и абсолютные значения напряжений. Измерения напряжений в массиве на руднике пока не проводились, поэтому абсолютные значения напряжений, как и соотношение их горизонтальной и вертикальной составляющих горного давления, неизвестны.

Визуальные наблюдения за состоянием выработок на Втором Березниковском руднике, а также данные геологической службы рудника свидетельствуют о том, что интенсивное проявление горного давления начинается сразу же после проведения выработки. Несмотря на то что выработки, проводимые комбайнами, наиболее устойчивы, так как сечение их круглой или сводчатой формы, сразу же после их проведения начинается отслоение породы. Очень часто в выработках наблюдаются изгиб и отслоение слоев в кровле, продольные трещины в кровле по оси выработки, растрескивание по вертикальным трещинам межходовых целиков и выдавливание из них глинистых прослоев.

Наблюдения за состоянием дренажных шпуров показали, что на контактах пластов всегда имеется газ, количество которого колеблется в весьма широких пределах. Газ находится под давлением до нескольких десятков атмосфер.

Механизм рассмотренных выше динамических явлений можно представить следующим образом.

Скорость проведения выработок комбайнами довольно велика. Ввиду этого только что обнаженные поверхности массива переходят из одного напряженного состояния в другое: часть массива, находящаяся до проведения выработки в состоянии всестороннего сжатия, получает возможность свободно деформироваться в сторону выработанного пространства. При этом знак напряжений изменяется, в приконтурной части массива появляются растягивающие напряжения. В кровле выработки проявлению действия растягивающих напряжений способствует собственный вес породы. Учитывая, что сцепления слоев на контактах с глинистыми прослоями практически отсутствует, можно предположить, что этих напряжений оказывается достаточно, чтобы произошло нарушение сплошности массива по контактам с глинистыми прослоями, а затем и прогиб отделившегося слоя в кровле выработки.

Если произошли отслоение и прогиб слоя, находящегося в непосредственной кровле выработки, то эти явления могут распространиться на вышележащие слои пород. При этом пролет каждого вышележащего слоя и стрела его прогиба будут уменьшаться по сравнению с нижележащими слоями.

Таким образом, зона разгрузки слоев, подверженных отслоению и прогибу, должна иметь в вертикальной плоскости форму

усеченного конуса, сужающегося кверху. Для каждого слоя наиболее опасными местами с точки зрения разрушения будут три точки максимального прогиба слоев: в центре прогиба (на оси выработки) и в местах «закрепления» слоя по обе стороны массива, т. е. в точках, где отслоение прекращается. В этих точках во внешнем слое изогнутой балки будут действовать максимальные растягивающие напряжения.

В определенных условиях эти напряжения могут достигать предельных значений. В таких случаях происходит разрыв слоев в точках прогиба — в одной (центральной) или в двух (боковых). По-видимому, в обычных условиях при отсутствии в местах отслоений значительных скоплений газа максимальные напряжения могут достигать таких значений, при которых происходит только разрыв слоев, расположенных вблизи от поверхности массива по середине прогиба (трещины в кровле по оси выработки).

В тех случаях, когда на контактах пластов имеется одно или несколько относительно крупных скоплений газа, газ, устремляясь в область расслоения, может мгновенно увеличить напряженность изогнутых слоев до величины, при которой происходит обрушение.

Если в кровле или в почве выработки имеется выбросоопасный участок (соляная порода, характеризующаяся повышенным содержанием связанных газов, пониженной прочностью и повышенной упругостью), то деформация упругого восстановления может способствовать развитию выброса породы и газа как из кровли, так и из почвы выработки. В стдельных случаях обрушение и выброс могут произойти одновременно.

Таким образом, основными факторами, вызывающими обрушения пород при проведении выработки в аналогичных горнотехнических условиях, по предварительным данным, можно считать:

- расслоение пород кровли по глинистым прослоям, начинающееся с нижнего слоя непосредственной кровли выработки;
- наличие относительно крупных скоплений газов на контактах пластов.

Для того чтобы не происходило обрушений, необходимая ликвидация расслоения пород кровли достигается двумя путями:

- изменением формы сечения выработки на более устойчивое по сравнению с круглым или сводчатым, при котором исключалась бы возможность расслоения, например, на эллиптическое сечение с длинной вертикальной осью;
- креплением выработки, также исключаяющим возможность расслоения кровли.

Снижение давления контактных газов в крупных скоплениях может быть достигнуто применением дренажного бурения. Наблюдения за дренажными шпурами, пробуренными на глубину 1,5 м в кровле выработок, проводимых по обоим промышленным пластам, показали эффективность дренажного бурения. Поэтому задача состоит в разработке оптимальных параметров дренажного

бурения. Необходимо установить момент бурения, местоположение и глубину шпуров или скважин, их число и расстояние между ними.

Однако проведенные исследования не раскрывают полностью причин и механизма рассматриваемых динамических явлений. Для более глубокого и полного понимания этих явлений необходимо знать абсолютные значения напряжений массива к моменту обрушений и выбросов (как вертикальную, так и горизонтальную составляющие), давление газа в пласте и формы его нахождения, т. е. необходимо глубокое и всестороннее комплексное исследование ряда вопросов.

Внезапные выбросы соли и газа распространены на калийных рудниках бассейна Верра (ГДР), на Верхнекамских и Солигорских рудниках и Индерском месторождении СССР. Считая, что основными причинами выбросов соляных, так же как и других пород, являются напряженно-деформированное состояние массива, заключенный в породе газ и некоторые ее физико-механические свойства, нельзя не отметить существенные отличия выбросов от других динамических явлений (обрушений с выделением газа и горных ударов с выделением газа) и от внезапных выбросов угля и газа.

Вопросы, связанные с внезапными выбросами соли и газа, происходящими на калийных месторождениях СССР, рассматриваются в следующих главах этой книги.

§ 2. Методика исследования газовыделений *

Количество выделяющихся в выработку газов можно установить по количеству выделяющихся газов из всех источников. Число источников газовыделений зависит от способа ведения горных работ — в основном от системы разработки и способа отбойки полезного ископаемого. Как уже отмечалось, наиболее распространенная система разработки на калийных рудниках — камерная, способы выемки руды — буровзрывной и комбайновый.

При камерной системе разработки подготовительные и очистные забои отличаются обычно только размерами.

При ведении работ буровзрывным способом источниками газовыделений в забоях очистных и подготовительных выработок являются: обнаженные поверхности массива, отбойные шпуров, отбитая порода.

Особо следует выделить газовыделения при взрывных работах, источник которых суммарный — это газ, выделяющийся с

* В данном параграфе освещаются вопросы, связанные только с определением количества выделяющихся горючих и вредных природных газов. Вопросы изучения состава газов, а также такие факторы, как горное давление, физико-механические свойства пород и другие, вызывающие газодинамические явления, здесь не рассматриваются.

обнаженной поверхности массива и по трещинам из массива, а также из только что разрушенной породы в забое.

Рассмотрим методiku определения газовыделений из каждого источника в отдельности.

Газовыделения с обнаженной поверхности массива. Сущность исследований заключается в определении количества горючих газов, выделяющихся в единицу времени с единицы площади обнаженной поверхности массива. Для этого определенная площадь поверхности обычно на стенке выработки изолируется от окружающей атмосферы с помощью специального металлического щита. Через изолированный объем с небольшой скоростью протягивается рудничный воздух.

В. П. Шатов для этой цели использовал эжекторный аспиратор типа АЭР-4 [28]. После продувки, обеспечивающей пятикратный обмен газовой смеси под щитом, отбирались пробы воздуха, выходящего из-под щита, и пробы воздуха у точки наблюдения. По концентрации газа и объему пропущенного под щитом воздуха можно определить объем выделившихся горючих газов. Проводя такие замеры через определенные интервалы времени несколько раз — с момента обнажения поверхности и до прекращения газовой выделений (отсутствия горючих газов в отобранной при очередном замере пробе), можно установить длительность газовой выделений, изменение интенсивности газовой выделений во времени и подсчитать абсолютное количество выделившегося горючего газа.

Газовыделения из шпуров на Верхнекамском месторождении наблюдаются на всех промышленных пластах. Эти газы выделяются в основном бывают медленными и спокойными (обычные), а иногда бурными, сопровождающимися выбросами бурового штыба, толчками, повышением концентрации горючих газов в районе бурения (суфлярные).

Объем газовой выделений в этом случае устанавливается по количеству газа, выделяющегося из отдельного шпура за весь период газовой выделений (с момента окончания бурения до прекращения газовой выделений). С помощью газозатвора, прибора Энглера или другого герметизирующего устройства производится герметизация шпура. Наблюдения заключаются в периодическом замере скорости нарастания давления до максимального и отборе проб газа из шпура на химический анализ. Наблюдения прекращаются тогда, когда избыточное давление в шпуре, свидетельствующее о выделении газа, снижается до 2—10 мм рт. ст. или совсем исчезает.

Количество газа, выделяющегося из шпура за 1 мин, при данном замере может быть рассчитано по формуле

$$q_n = \frac{Vh}{760t_n}, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (5)$$

где V — объем загерметизированной части шпура, м^3 ; h — давление газа в шпуре, мм рт. ст.; t_n — время наблюдения (время на-

растания давления до максимальной постоянной величины), мин.

Объем газа, выделившегося из одного шпура за период между двумя замерами, определяется по формуле

$$q_{\text{шп}} = \frac{q_n + q_{n+1}}{2} \Delta t, \quad (6)$$

где q_n и q_{n+1} — газовыделения соответственно при предыдущем и последующем замерах, м³/мин; $\Delta t = (t_{n+1} - t_n)$ — время между двумя замерами, мин.

Объем газа, выделившегося из одного шпура за весь период газовойделения,

$$Q'_{\text{шп}} = \Sigma q_{\text{шп}}. \quad (7)$$

Объем газа определится как сумма количеств газа, выделившегося из отдельных шпуров,

$$Q_{\text{шп}} = \Sigma Q'. \quad (8)$$

По данным наблюдений за газовойделениями из шпуров можно установить не только объем, но и распределение газа в массиве на глубину бурения, а также его давление в шпурах, которое, как правило, меньше давления газа в пласте, но в случае крупных скоплений приблизительно равно пластовому.

При бурении глубоких шпуров и скважин и попадании их в крупное скопление газа по такой методике может быть зафиксировано суфлярное выделение, длительность его действия, определены объем и давление газа.

Газовыделения из отбитой породы. При взрывной отбойке в связи с дроблением горной породы в рудничную атмосферу выделяются не только свободные, но и частично связанные газы.

Методика изучения газовойделений из отбитой руды, примененная В. П. Шатовым, заключалась в следующем [28].

Сразу после взрывания до включения вентилятора местного проветривания из отбитой руды в двух-трех точках забоя отбирали пробы газа специальным пробоотборником. Последующие пробы отбирали через каждые 30—60 мин до полной выгрузки руды из забоя (обычно 9—12 проб). Объем газов, содержащихся в отбитой руде, подсчитывался по формуле

$$Q_{\text{отб.р}} = \frac{V_{\text{отб.р.с}}}{100} (k - 1), \text{ м}^3, \quad (9)$$

где $V_{\text{отб.р}}$ — объем отбитой руды (в массиве), м³; c — средняя концентрация горючих газов в пробе, %; k — коэффициент разрыхления руды.

Разность между первоначальным и конечным содержанием газа в отбитой руде с учетом изменения ее объема составляет объем горючих газов, выделившихся в рудничную атмосферу.

Газовыделения при взрывных работах. В момент взрывания происходит мгновенное разрушение большого объема породы,

вследствие чего газовыделение резко возрастает. Пермским политехническим институтом (ППИ) проводились наблюдения за газовыделениями при взрывных работах в камерах карналлитового пласта В Соликамского рудника. Объем горючих газов определяли по известному количеству воздуха, поступающего в камеру, и по измеренному содержанию горючих газов в исходящей струе камеры [15].

Свежий воздух подается в камеру, как правило, по трубопроводу вентилятором местного проветривания, работающим на нагнетание. Исходящая струя выходит через горловину камеры на выемочный штрек. Скорость движения воздуха в горловине мала и измерить ее анемометром не удастся, поэтому измерение количества воздуха производилось в нагнетательном трубопроводе с помощью трубки Пито и микроманометра.

Пробы воздуха отбирали на химический анализ следующим образом. После взрыва при выключенном вентиляторе горноспасатель входил в респираторе в камеру и в непосредственной близости от забоя отбирал первую пробу у кровли пласта, среднюю пробу или несколько проб по ширине и высоте забоя. Последующие пробы отбирались в горловине камеры с помощью специального пробоотборника при включенном вентиляторе через равные промежутки времени (10—15 мин). Всего отбиралось 10—12 проб.

Объем газов, выделившихся после взрывания, определялся из выражений:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{взр}} &= \Sigma q, \text{ м}^3; \\ q &= \frac{(c_n + c_{n-1})}{200} Q_{\text{в}} (t_n - t_{n-1}), \text{ м}^3, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где q — объем горючих газов, выделившихся в промежуток времени между отбором двух проб; c_n — содержание горючих газов в пробе, взятой в момент t_n после включения вентилятора, %; c_{n-1} — содержание горючих газов в пробе, взятой в момент t_{n-1} после включения вентилятора, %; $Q_{\text{в}}$ — производительность вентилятора, м³/мин.

При ведении очистных и подготовительных работ комбайновым способом источниками газовыделений являются только обнаженные поверхности массива и отбитая руда, которая находится в забое непродолжительное время (на перегружателе комбайна до момента погрузки ее в самоходный вагон).

Н. А. Трофимовым (ППИ) проводились наблюдения за газовыделениями в выработках, пройденных комбайнами по пластам А—Б и Красному II, на 1БКР и 2БКР [22].

Газовыделения с обнаженной поверхности массива определялись также изоляцией части пространства выработки с помощью металлического щита. Однако методика установления объема выделяющихся горючих газов несколько отличалась от вышеописанной, так как газовыделения были малы и для определения горю-

чих газов в пробе, взятой из-под щита, необходим был прибор, позволяющий анализировать с точностью до 0,001 %.

Количество выделяющегося газа устанавливалось следующим образом. Щитом закрывался участок стенки выработки площадью 0,25 м². Объем подщитового пространства при этом составлял 0,0125 м³. В верхней части щита попарно располагались 4 патрубка (рис. 16), снабженные резиновыми трубками с зажимами.

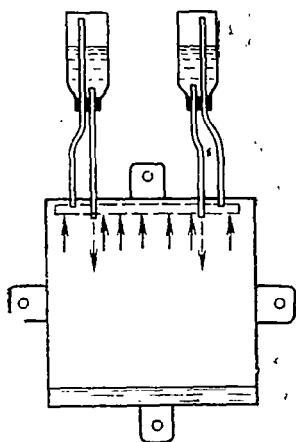


Рис. 16. Схема установки щита для наблюдений за газовыделениями с поверхности массива

В момент изоляции подщитового пространства рядом со щитом отбиралась проба воздуха, по данным анализа которой устанавливалась концентрация газа в изолированном объеме в первоначальный момент. По истечении определенного промежутка времени, продолжительность которого определялась опытным путем и в зависимости от интенсивности газовыделения составляла 15—30 мин, к резиновым трубкам, пережатым зажимами, присоединялись две заполненные водой бутылки (см. рис. 18).

Через пробку в каждой бутылке пропущены короткая и длинная трубки. По мере выливания воды через короткую трубку бутылка заполнялась поступающим через длинную трубку воздухом из подщитового пространства. Для равномерного отсоса воздуха из подщитового пространства под верхней стенкой щита

прикреплялась трубка с отверстиями и двумя припаянными трубками меньшего диаметра, через которые воздух из-под щита поступал в бутылки. После заполнения бутылки газовой смесью бутылку отсоединяли. Короткие резиновые трубки щита пережимали. Герметичность изоляции проверялась отсутствием утечек воды из-под щита.

Объем газа, выделяющегося с обнаженной поверхности массива, определялся по формуле

$$q'_m = \frac{\Delta c h}{t} \cdot 10^{-2}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}), \quad (11)$$

где Δc — прирост концентрации газа под щитом, %; h — высота щита, м; t — время опыта, мин.

При этом способе даже в случае незначительного газовыделения в изолированном пространстве создавалась такая концентрация газа, которая могла быть определена на обычной газоаналитической аппаратуре.

Полученные данные обрабатывались с целью установления закономерности изменения интенсивности газовыделений во времени, определения объемов газов и т. д.

Наблюдения за газовыделениями из отбитого исполнительным органом комбайна полезного ископаемого заключались в следующем: определялось количество воздуха, поступающего в забой, измерялась длина призабойного пространства с целью установления места отбора пробы, отбирались пробы для определения концентрации горючих газов.

Количество воздуха, поступающего в забой для проветривания по трубопроводам, измерялось с помощью воздухомерной трубки Пито и микроманометра типа ММН. Пробы воздуха отбирались на исходящей из забоя струе на расстоянии 13—20 м от забоя. Пробы воздуха отбирались у перегружателей или самоходных вагонов «мокрым» способом по общепринятой методике. В каждом пункте наблюдений отбирали не менее двух проб.

Объем горючих газов вычислялся по формуле

$$q_0 = \frac{cQ3600}{100} = 36cQ, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (12)$$

где q_0 — общее количество или объем газов, выделяющихся в призабойном пространстве, $\text{м}^3/\text{ч}$; c — концентрация горючих газов в исходящей струе, %; Q — количество воздуха, поступающего в призабойное пространство для проветривания, $\text{м}^3/\text{с}$.

§ 3. Газовыделения при производственных процессах

На калийных рудниках Советского Союза применяются как буровзрывной, так и комбайновый способы выемки полезного ископаемого. Ввиду различного воздействия на массив при этих способах даже в одинаковых горно-геологических условиях количество выделяющихся газов неодинаково.

При ведении очистных и подготовительных работ буровзрывным способом газ выделяется в забой из шпуров, с поверхности выработок, из отбитой руды, находящейся в выработке, и при взрывании.

Газовыделения при ведении очистных работ буровзрывным способом на Верхнекамских калийных рудниках (Соликамском и Первом Березниковском) изучались К. В. Кочневым, Т. К. Ефремовой, А. Н. Дударевым, В. П. Шатовым [8, 28]. В табл. 10 приведен суточный газовый баланс камер Первого Березниковского рудника.

Из табл. 10 видно, что наибольшее количество газа выделяется при ведении взрывных работ. При этом количество выделившегося газа для отдельных пластов составляет от 43,7 (пласт АБ) до 323,5 $\text{м}^3/\text{сут}$ (карналлитовый пласт В) или от 49,4 до 88,6%. Объем газовыделений из отбитого полезного ископаемого в период скреперования в газовом балансе пластов составляет от 5,3 (пласт В) до 46,8 % (пласт Красный II) или от 19,3 до 54,5 $\text{м}^3/\text{сут}$. При бурении шпуров и с обнаженных поверхностей камеры выделяется

Таблица 10

Газовыделение	Пласт					
	B		A—B ¹		Красный II	
	м ³	%	м ³	%	м ³	%
Из шпуров	0,29	2,70	0,13	1,50	0,30	0,42
При взрывных работах	2,32	21,60	4,44	50,50	4,20	58,78
При скреперовании	3,84	35,70	4,20	48,00	2,92	40,80
С поверхности массива	4,29	40,00	*	—	*	—
Всего	10,74	100	8,77	100	7,15	100

* Методика, примененная автором работы [28], не позволила установить объем газовыделений из массива (см. § 2 данной главы).

небольшое количество газа, которое в газовом балансе пластов составляет от 5,6 до 24,2%.

Газовыделение при взрывных работах происходит практически мгновенно, тогда как при других производственных процессах — относительно медленно и равномерно. Поэтому случаи загазирования выработок на калийных рудниках чаще всего связаны с газовыделениями при взрывных работах. Иногда концентрация горючих газов в забое в результате газовыделения достигает 80%, а время проветривания — несколько часов. За 1961 г. число случаев загазирования забоев с содержанием горючих газов более 1% на Первом Березниковском руднике составило: по пласту B 99, по пласту A—B — 5, по пласту Красному II — 14.

На Калушском калийном руднике случаи загазирования забоев при концентрации газа более 1% еще более редки и число их не превышает 10—15 в год.

По данным А. Н. Веденина (ЛГИ), из 5000 проб, отобранных ВГСВ на Первом и Втором рудниках Стебниковского калийного комбината в течение пяти лет только в девяти был обнаружен метан. Содержание его составляло от 0,02 до 0,10%. Эти пробы были отобраны после взрывных работ в тупиковых выработках. Исследованиями ЛГИ в 1971 г. установлено присутствие горючих газов в исходящих струях камер и участков Второго Стебниковского рудника при всех производственных процессах. Выделяется метан (сотые доли процента), водород и тяжелые углеводороды (следы).

Горючие газы в рудничной атмосфере Второго Солигорского рудника комбината «Белорускалий», также по данным А. Н. Веденина, зафиксированы только после взрывания. В камерах горизонта 445 м обнаружен метан, концентрация которого не превышает 0,15%.

На Соликамском руднике были проведены исследования с целью изучения газовыделений при взрывных работах по пласту B. Исследования включали непосредственные замеры объемов га-

зов, выделяющихся при взрывании массива, изучение горно-геологических и горнотехнических факторов, влияющих на газовыделение, обработку материалов по химическому анализу проб воздуха в лаборатории ВГСВ рудника. Обработка данных этой лаборатории показала, что случаи, когда содержание горючих газов после взрывных работ превышает 1%, довольно редки. Так, из 8799 проб, отобранных за год, в 1870 пробах (21,3%) горючие газы не были обнаружены, в 6198 пробах (70,5%) содержание их не превышало 1% и только в 731 пробе (8,2%) концентрация горючих газов была более 1%.

Число крупных газовыделений продолжительностью более 1 ч на Соликамском руднике не превысило 10% общего числа взрываний. Распределение случаев загазования забоев продолжительностью более 1 ч при концентрации горючих газов свыше 1% приведено в табл. 11.

Таблица 11

Год	Время проветривания, ч							
	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—10	Более 10
Первый	262	57	31	19	13	6	10	14
Второй	239	72	46	28	19	5	19	9
Третий	250	80	32	36	20	12	37	44

Число газовыделений продолжительностью от 1 до 2 ч в камерах за год составляет 6% общего числа взрываний, от 2 до 3 ч — 1,7%, от 3 до 4 ч — около 0,9%.

Крупные выделения газа при ведении взрывных работ сравнительно редки, поэтому для определения объемов горючих газов, выделяющихся при взрывании, а также изучения факторов, влияющих на эти газопроявления, выбирались такие камеры, в которых по определенным признакам ожидалось более или менее значительные газовыделения. Такими признаками были: наличие складчатости в кровле пласта, увеличение мощности шестого слоя карналлитового пласта В и др. Всего было проведено 97 наблюдений. В 66 случаях были обнаружены горючие газы и только в 52 случаях удалось определить их объем.

На основе анализа этих данных установлено, что газовыделения при взрывных работах можно четко подразделить на три группы: малые, средние и крупные. Малые газовыделения представлены гнездовыми и коржевыми газами, объем которых колеблется от 1 до 30 м³ и в среднем составляет 12,7 м³ за одно взрывание. Средние газовыделения представлены в основном коржевыми газами объемом от 30 до 100 м³ в среднем 60,3 м³, крупные — газами, содержащимися в сводах микроантиклинальных складок объемом от 100 до 4000 м³ в среднем 893 м³.

Статистическая обработка материалов наших наблюдений и работы [28] показала, что наиболее вероятными являются малые газовыделения (вероятность равна 0,173), далее следуют средние (0,069) и, наконец, крупные газовыделения (0,044). Первой группе газовыделений отвечает и наибольшая плотность вероятности, а минимальная плотность — третьей группе.

Определение доверительных интервалов с достоверностью, равной 0,95, показало, что вероятность выделения газов объемом 12,7 м³ находится в пределах 0,16—0,19, объемом 60,3 м³ — 0,03—0,11, крупных газовыделений объемом 893 м³ — 0,02—0,07. В большинстве случаев объем выделившегося условного метана не превышал 100 м³ и только в 7 случаях (7,2%) был более 100 м³.

Относительная величина газовыделений, выраженная в кубических метрах условного метана на 1 м³ отбитой горной массы, распределялась следующим образом: до 0,1 м³/м³ — 54,6%; от 0,1 до 1 м³/м³ — 36,1%, от 1 до 2 м³/м³ — 3,1%, более 2 м³/м³ — 6,2%.

Таким образом, основной объем газовыделений (93,8%) не превышает 2 м³ условного метана на 1 м³ горной массы. Газовыделения объемом более 1 м³/м³ довольно редки. Если учесть, что наблюдения проводились не за всеми камерами, а также то обстоятельство, что необычные газовыделения (выбросы) не включаются в расчеты при оценке величины относительной газообильности, за относительную газообильность наиболее газоносного карналлитового пласта Верхнекамского месторождения со значительным запасом можно принимать 2 м³ условного метана на 1 м³ отбиваемой в камере горной массы.

Статистическая обработка материалов химической лаборатории Соликамского рудника по анализам проб воздуха и маркшейдерских замеров мощности слоев, слагающих карналлитовый пласт, показала, что между числом газовыделений и мощностью шестого слоя существует зависимость. График, представленный на рис. 17, построен по результатам обработки 1220 случаев газопроявлений в 56 камерах, когда содержание горючих газов в забоях превышало 1%.

Обработка и анализ 52 наблюдений за газопроявлениями на руднике подтвердили эту зависимость. На рис. 18 показано изменение объема газов (СН₄ и Н₂), выделившихся при взрывных работах, в зависимости от мощности шестого слоя карналлитового пласта В.

Наиболее распространенная мощность шестого слоя — менее 4,5 м (85,8% от общего числа замеров). Мощность более 4,5 м составляет 14,2% от общего числа замеров. Последняя цифра достаточно хорошо согласуется с количеством значительных газовыделений (вероятность средних и крупных газовыделений 0,103).

Существенное влияние на величину газовыделений оказывает число шпуров, взрывааемых в передовом уступе, обрабатываемом под кровлей пласта. Из графика (рис. 19) можно видеть, что при

взрывании от 6 до 8 шпуров (масса заряда в шпуре 0,6 кг) объем горючих газов ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$), как правило, не превышает 15 м^3 . С увеличением числа шпуров до 18 объем газов достигает 50 м^3 .

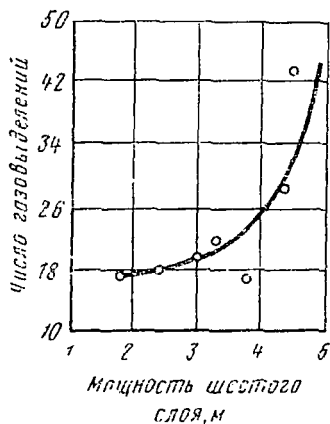


Рис. 17. Зависимость числа газовойделений от мощности шестого слоя пласта В

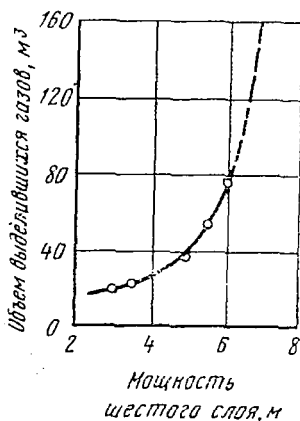


Рис. 18. Зависимость объема горючих газов от мощности шестого слоя пласта В

Дальнейшее увеличение числа шпуров приводит к резкому увеличению газовойделений.

С увеличением числа шпуров в верхнем уступе возрастает не только объем газовойделений, но и выход руды, приходящейся на один шпур (рис. 20). Выход руды из нижних уступов прямо пропорционален числу взрывааемых шпуров (см. рис. 20, прямая линия). Выход руды из верхнего уступа при небольшом числе шпуров совпадает с выходом руды на один шпур из нижних уступов. При числе шпуров 15—18 и более эта закономерность нарушается — выход руды на один шпур увеличивается, что объясняется участием газа в процессе отделения полезного ископаемого от массива.

Анализируя данные наблюдений, можно сделать вывод, что выбор параметров буровзрывных работ позволяет управлять газовойделениями при взрывной отбойке полезного ископаемого.

Газовойделения при проведении выработок комбайнами. На некоторых калийных рудниках Советского Союза (Второй Березниковский и Солигорские) проведение подготовительных выработок и очистная выемка ведутся почти исключительно комбайнами. На других рудниках (Первый Березниковский и Соликамский) горнопроходческие комбайны применяются только для проведения отдельных выработок.

Скорость проведения выработок комбайнами значительно выше, чем буровзрывным способом. Таким образом, за единицу вре-

мени в выработке, проводимой комбайном, обнажается значительно бóльшая поверхность газоносного массива, чем при буровзрывном способе. Другим источником газовыделения в вы-

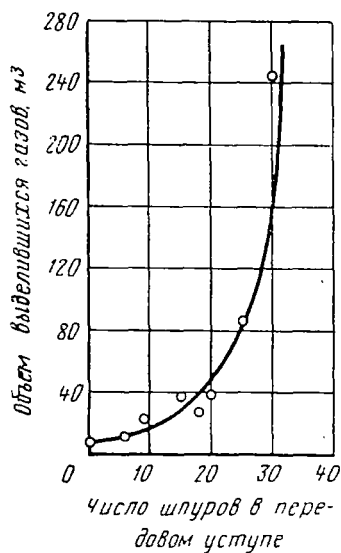


Рис. 19. Зависимость объема газовыделений от числа шпуров в верхнем уступе

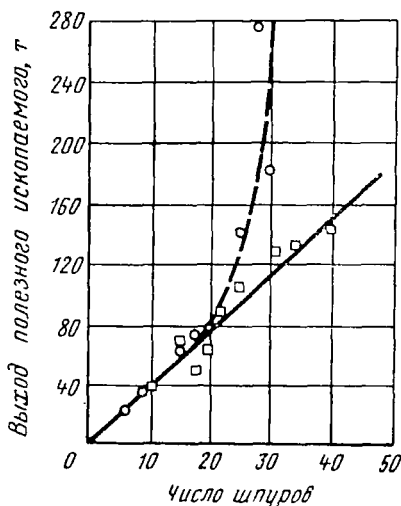


Рис. 20. Зависимость выхода руды от числа шпуров в уступах

работке, проводимой комбайном, является отбитая, разрушенная руда.

Названные два источника газовыделений при комбайновом способе выемки отличаются от этих же источников при буровзрывном. Массив, окружающий выработку, в первом случае значительно менее нарушен, чем во втором. Это уменьшает интенсивность газовыделения с поверхности выработки и глубину дренирования. Полезное ископаемое при условии погрузки его комбайном в самодвижные вагоны находится в забое очень непродолжительное время и постоянно сменяется свежотбитым полезным ископаемым, тогда как при буровзрывном способе выемки и скреперной погрузке оно может находиться в выработке несколько часов, а иногда и смен. Таким образом, газовыделения во времени из отбитого полезного ископаемого в том и другом случае неодинаковы. В целом газовыделения при комбайновом способе выемки более равномерны, чем при буровзрывном. Однако не исключено, что при определенных условиях в забоях комбайновых выработок могут появиться высокие концентрации горючих газов.

Н. А. Трофимовым (ППИ) была проведена статистическая обработка данных наблюдений за содержанием газов в рудничной атмосфере комбайновых выработок пласта Красного II [22].

Всего было обработано 2720 проб, отобранных в выработках, которые, как правило, не проветривались. Результаты обработки данных показали, что вероятность появления различных концент-

траций горючих газов (в пересчете на условный метан) описывается кривой, изображенной на рис. 21. Среднее значение концентрации условного метана, определяемое как центр тяжести фигуры, ограниченной кривой (см. рис. 21), равно 0,2%. Вероятность появления условной концентрации метана более 1% составляет 0,0434, а с учетом тройной ошибки отклонения находится в пределах 0,0316—0,0552. Таким образом, повышенные концентрации горючих газов выше нормы следует ожидать в 32—55 случаях из 1000. Отсюда следует, что в непроветриваемых забоях вероятность появления опасных скоплений газов превышает относительно безопасные пределы минимум в 30 раз, следовательно, проветривать такие выработки совершенно необходимо [22].

В 1969 г. Н. А. Трофимовым при участии авторов были проведены наблюдения за газовыделениями с обнаженных поверхностей подготовительных выработок, проходимых комбайнами по пластам А—Б и Красному II на руднике Второго Березниковского калийного комбината. Установлено, что наибольшую опасность представляют выделения метана. Кроме равномерного выделения газов со всей поверхности обнажения происходит повышенное выделение их на отдельных участках в виде микросуфляров. Микросуфляры чаще всего приурочены к контактам соляной породы с глинистыми прослоями. Эти выделения газа сопровождаются шипением, характерным потрескиванием, а при увлажненной поверхности — образованием мелких пузырей и брызг. Продолжительность действия микросуфляров колеблется от нескольких часов до 10 сут и более. Наибольшая зафиксированная продолжительность газовыделений из микросуфляров составила 144 ч по пласту Красному II и 350 ч по пласту А—Б. Однако количество выделившегося при этом метана было незначительным — соответственно 0,031 и 0,21 м³.

По результатам наблюдений получены зависимости газовыделений от времени с момента обнажения массива, которые достаточно хорошо описываются уравнением (рис. 22, а, б, кривые 1)

$$q = a'e^{-bt}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (13)$$

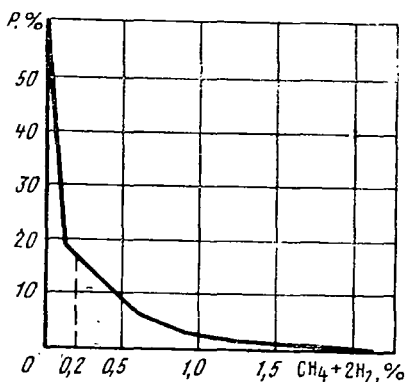


Рис. 21. Вероятность P появления различных концентраций горючих газов

где a' и b — экспериментальные коэффициенты, равные для пласта Красного II соответственно 0,0009 и 0,035 и для пласта А—Б — 0,0028 и 0,015; t — время обнажения поверхности, ч.

Это уравнение характеризует процесс газовыделения, но не позволяет определить объем выделившегося газа. Абсолютное га-

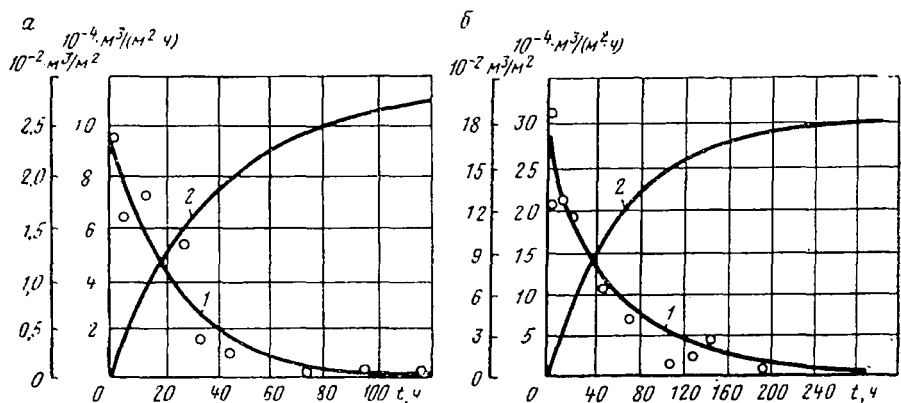


Рис. 22. Изменение объема выделяющихся с поверхности массива горючих газов во времени:

а — в выработках пласта Красного II; б — пласта А—Б: 1 — газовыделение в данный момент времени; 2 — полное газовыделение с момента обнажения

зовыделение с участка обнаженной поверхности пласта по истечении любого промежутка времени с момента обнажения можно получить интегрированием полученного выражения в пределах от 0 до t (рис. 22, кривые 2):

$$q' = \int_0^t a' e^{-bt} dt. \quad (14)$$

После математических преобразований [22] получено выражение для определения общего количества горючих газов, выделяющихся в 1 ч из массива в выработки при любой их длине,

$$q_M = \frac{a P_v A}{1 + d \sqrt{\frac{A}{l}}}, \quad \text{м}^3/\text{ч}, \quad (15)$$

где $a = 100 a'$; P_v — периметр выработки в свету, м;

A — производительность комбайна (средняя скорость проведения выработки), м/ч; d — опытный коэффициент, равный 24 для пласта красного II и 9,5 для пласта А—Б.

Если время, прошедшее с начала работы комбайна в данной выработке, больше периода дренирования, то в формулу (15) вместо l подставляется l_{\max} :

$$l_{\max} = AT_{\text{др}}, \quad \text{м}, \quad (16)$$

где $T_{др}$ — период дренирования пласта (120—130 ч для пласта Красного II и 300—320 ч для пласта А—Б).

Если работы по проведению выработки приостановлены, то количество газа $q_{ост}$, выделившегося в выработку за период $t_{ост}$, можно определить из выражения

$$q_{ост} = \frac{100aP_{вA}}{(dt^{-0,5} + 1)(dt_{ост}^{-0,5} + 1)}, \text{ м}^3. \quad (17)$$

Коэффициент неравномерности газовыделений с обнаженной поверхности пластов определяется по формуле

$$k_{н} = 1 + 2,57 \frac{\sigma}{Q_{м.ср}}, \quad (18)$$

где $Q_{м.ср}$ — среднеквадратичное отклонение объемов газа, выделяющегося с 1 м² обнаженной поверхности пласта за весь период дренирования, равное 0,0042 для пласта Красного II и 0,027 и для пласта А—Б;

σ — среднее значение объема газа, выделившегося с 1 м² обнаженной поверхности пласта за весь период; для пласта Красного II равно 0,029 м³ и для пласта А—Б — 0,181 м³.

Полученные значения коэффициента $k_{н}$ для пласта А—Б составляют 1,38 и для пласта Красного II — 1,37. Для расчета значения коэффициентов для того и другого пласта можно принять равным 1,4. Формулы (15) и (18) могут быть использованы для других месторождений после определения численного значения эмпирических коэффициентов.

Объемы газовыделений с обнаженных поверхностей пласта Красного II в комбайновых выработках Первого и Второго Березниковских рудников примерно одинаковы — соответственно 0,0293 и 0,0290 м³/м². При проведении выработок комбайном ШБМ-2 количество выделяющихся горючих газов из массива при скорости проведения 25 м/сут составит около 3 м³/сут, при проведении комбайном ПК-8 при скорости проведения 40 м/сут — около 5 м³/сут.

Как уже отмечалось, практика проведения комбайновых выработок по пласту Красному II на Первом Березниковском руднике показала, что при неудовлетворительном проветривании вероятность возникновения опасных концентраций горючих газов превышает относительные пределы безопасности более чем в 30 раз. По-видимому, эти же условия характерны и для пласта Красного II на Втором Березниковском руднике.

Общее количество выделяющегося в выработку газа складывается из объема газа $q_{м}$, отдаваемого обнаженными поверхностями массива, объема газа $q_{отб}$, выделяющегося из отбитого полезного ископаемого, находящегося в забое:

$$q_0 = q_{м} + q_{отб}. \quad (19)$$

Если считать в первом приближении, что весь газ, содержащийся в породе, выделяется в рудничную атмосферу при разрушении породы рабочим органом комбайна, объем газовой выделенной из отбитого полезного ископаемого определяется по формуле

$$q_{\text{отб}} = q_r SA, \quad (20)$$

где q_r — газоносность пласта по горючим газам, $\text{м}^3/\text{м}^3$; S — площадь поперечного сечения выработки, м^2 .

Подставляя значения q_m из формулы (15) и $q_{\text{отб}}$ из формулы (20) в выражение (19), получим

$$q_0 = \frac{aP_B A}{1 + d \sqrt{\frac{A}{l}}} + q_r SA. \quad (21)$$

На Втором Березниковском руднике при проведении выработок по пластам Красному II и А—Б применяется дренажное бурение. Шпуров длиной 1,5 м бурятся в кровле через 1,5—2 м. Назначение их — вскрыть скопления контактных газов в непосредственной кровле, создать условия для выделения этих газов через шпур. Очевидно, что из дренажных шпуров газ выделяется в основном в зоне работы комбайна, т. е. в тех же местах, где происходит и газовыделение из отбитой руды.

Методика наблюдений Н. А. Трофимова позволила определить суммарное количество выделяющихся горючих газов в выработке, а вычитанием из общего объема выделившихся газов объема газов, выделившихся из массива, — получить суммарный объем газовой выделенной из отбитой руды и дренажных шпуров. Последний составил: для пласта Красного II — от 0,53 до 1,46 $\text{м}^3/\text{ч}$ (в среднем 1,0 $\text{м}^3/\text{ч}$), для пласта А—Б — от 1,3 до 2,82 $\text{м}^3/\text{ч}$ (в среднем 1,93 $\text{м}^3/\text{ч}$). Колебание объемов газовой выделенной объясняется неравномерностью распределения газоносности пластов по площади и в значительной степени неравномерностью газовой выделенной из дренажных шпуров, что подтверждается данными исследований.

§ 4. Газообильность рудников

На калийных рудниках, где очистные и подготовительные работы ведутся буровзрывным способом, наибольшая интенсивность газовой выделенной, как отмечалось выше, связана со взрывными работами. Газовыделения при других производственных процессах значительно менее интенсивны, равномерны и более продолжительны. По данным В. П. Шатова, газовый баланс рудников (суточный по условному метану) характеризуется данными, приведенными в табл. 12

Ввиду эпизодичности газовой выделенной, связанных со взрывными работами, и при отсутствии значительных суфлярных или внезапных выделенной содержание горючих газов в исходящих струях

Таблица 12

Газовыделение	Первый Березниковский рудник		Соликамский рудник	
	м ³	%	м ³	%
Из шпуров	7,1	2,4	5,2	0,9
При взрывных работах	149,0	51,1	508,5	83,1
При скреперовании	114,8	39,3	77,3	12,6
Из стенок междукамерных целиков	22,1	7,2	20,5	3,4
Итого	293,0	100,0	611,5	100,0

рудников составляет тысячные и сотые доли процента и обычными газоаналитическими аппаратами не обнаруживается. Содержание газов в исходящих струях пластов также невелико. Например, содержание горючих газов в исходящих струях участков карналлитового пласта В на Соликамском и Первом Березниковском рудниках после ведения взрывных работ, как правило, не превышает сотых долей процента и колеблется от 0,01 до 0,09%, иногда составляя 0,1%. Определить содержание газов в этих выработках на сильвинитовых пластах часто не удается.

Вместе с тем в атмосфере забоев камер при бурении и особенно после взрывания шпуров содержание горючих газов может достигать десятков процентов, а в исходящей струе камер — нескольких процентов. Однако объем выделившихся газов в большинстве случаев невелик и содержание их в исходящей струе камеры составляет десятые доли процента. Это подтверждается результатами наблюдений, выполненных на Соликамском калийном руднике в камерах карналлитового пласта В (табл. 13).

Таблица 13

Место замера	Максимальное содержание газов, %				Объем газов, м ³
	в забое		в горловине		
	H ₂	CH ₄	H ₂	CH ₄	
Камера 9, блок 75	0,52	Нет	0,26	Нет	33,3
Камера 13, блок 13	8,2	2,0	0,13	»	5,3
Камера 32в, блок 3/5	9,5	2,0	0,53	»	17,8
Камера 30, блок 3/5	5,5	0,4	0,83	»	37,4
Камера 30, блок 3/5	8,5	2,1	0,03	»	1,4
Камера 11, блок 13	1,7	0,1	0,20	»	4,7
Камера 30, блок 3/5	0,26	Нет	0,20	»	4,0
Камера 13, блок 13	0,13	»	0,1	»	4,4
Камера 36, блок 3/5	44,2	15,5	2,8	0,4	224

В соответствии с «Едиными правилами безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным

способом» к рудникам, опасным по газу, относятся такие, в которых хотя бы на одном пласте обнаружены горючие газы. На калийных рудниках, где разрабатывается несколько пластов, при наличии среди них отдельных пластов или участков, опасных по газу, газовый режим распространяется только на эти пласты и участки при условии обособленного их проветривания.

Рудники, в которых обнаружен метан или водород, подразделяются на четыре категории по газообильности. К первой категории относятся рудники, на которых количество горючих газов ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$), выделившихся в сутки на 1 м^3 среднесуточной добычи горной массы, не превышает 7 м^3 , ко второй — от 7 до 14, к третьей — от 14 до 21, к сверхкатегорным — более 21 м^3 , а также рудники, разрабатывающие пласты, опасные по выбросам и суфлярам. При определении категории рудников по относительной газообильности 1 м^3 водорода принимается эквивалентным 2 м^3 метана.

На калийные рудники при обнаружении горючих газов в рудничной атмосфере распространяется газовый режим в соответствии с Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах.

По результатам наблюдений, проводившихся в течение нескольких лет на Верхнекамских калийных рудниках по методике, составленной для угольных шахт, относительная газообильность пласта Красного II не превышает $0,35 \text{ м}^3/\text{м}^3$ среднесуточной добычи горной массы, пласта А—Б — $0,84 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и карналлитового пласта — $1,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ суточной добычи. Относительная газообильность рудников в целом колеблется от 0,065 до $0,160 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Абсолютная газообильность по тем же замерам составляет $1—1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ или $1500—2000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Следует заметить, что в отличие от требований методики по определению относительной газообильности угольных шахт анализ содержания горючих газов проводился на аппарате А. А. Черепенникова с точностью 0,001% вместо 0,1%.

Методика установления газообильности, принцип деления рудников по относительной газообильности, а также нормы количества воздуха на 1 м^3 среднесуточной добычи горной массы заимствованы из практики угольных шахт. Отнесение количества выделяющегося газа к 1 м^3 горной массы, предложенное С. А. Израилем и включенное в ЕПБ, привело к единству требований газового режима как для угольных шахт, так и для рудников.

Однако нормирование количества воздуха по величине относительной газообильности угольных шахт имеет ряд существенных недостатков. Один из них заключается в том, что в менее газовые шахты требуется подавать относительно большее количество воздуха, чем в более газовые шахты. Разрыв между допустимым содержанием метана в исходящей струе шахты (0,75%) и содержанием метана, обусловленным подачей нормируемого количества воздуха, сокращается по мере увеличения категории шахты. Этот недостаток в одинаковой степени характерен и для калийных рудников (табл. 14)

Категория рудника	Норма количества воздуха, м ³ /мин	Газовыделение, м ³ /м ³	Содержание условного металла, %
I	1,40	1—7	0,05—0,35
II	1,75	8—14	0,32—0,56
III	2,10	15—21	0,50—0,70

Поскольку расчет количества воздуха для шахт, опасных по внезапным выбросам, ведется по величине абсолютного газовыделения (без учета газов, выделяющихся при внезапных выбросах), а такие шахты являются сверхкатегорными, то практически отсутствует какое-либо различие в нормах подачи воздуха для шахт, опасных по внезапным выбросам, и для шахт сверхкатегорных.

Иное положение на калийных рудниках. На этих рудниках разрыв между фактическим относительным газовыделением и относительным газовыделением, характерным даже для рудников III категории, весьма различается (фактическое газовыделение не превышает 1,5 м³/м³ вместо 21 м³/м³ для рудников III категории). Поэтому вряд ли можно считать обоснованным полуторакратное завышение количества воздуха, подаваемого для проветривания, предусмотренное действующими нормами (2,1 м³/мин вместо 1,4 м³/мин).

Количество воздуха, подаваемого на участок, определяется по среднесуточной добыче горной массы данного участка. Таким образом, на угольной шахте и на калийном руднике количество воздуха, подаваемого на участок, при прочих равных условиях остается постоянным. Однако на калийных рудниках при неизменной нагрузке на участок число циклов в течение суток в одной камере может меняться. С увеличением числа взрываний в камере, например от 1 до 2 в сутки, суточная добыча из камеры возрастает в 2 раза. Следовательно, количество воздуха, необходимого для проветривания очистного забоя, также должно быть увеличено в 2 раза, хотя расход ВВ и выход горючих газов за каждое взрывание остается постоянным в каждой смене.

Газопроявления на калийных рудниках характеризуются следующими особенностями:

- незначительным объемом газов, выделяющихся с обнаженных поверхностей разрабатываемых пластов и вмещающих пород;
- полным отсутствием миграции газов из соседних сближенных пластов в выработки разрабатываемого пласта;
- отсутствием газовыделений в выработанных пространствах;
- малой относительной и абсолютной газообильностью.

Учитывая эти особенности, представляется целесообразным изменить классификацию калийных рудников, предусмотренную

Правилами безопасности, и заменить ее более простой и отвечающей практике, а именно разделить все рудники (пласты, залежи) на две группы: не опасные и опасные по газовыделениям.

Фактический объем горючих газов и коэффициент неравномерности должны устанавливаться газоздушными съемками. Очевидно, что методика газоздушных съемок, заимствованная из практики угольных шахт и применяемая на рудниках, не может быть использована без соответствующей корректировки и переработки.

Для определения объема горючих газов, выделяющихся после взрывания, необходимо отбирать пробы на исходящих струях камер. Такая рекомендация, предложенная П. И. Мустелем, наиболее приемлема для калийных рудников, когда объемы выделений незначительны и содержание горючих газов в исходящих струях пластов, крыльев и рудников измеряется сотыми и тысячными долями процента.

Пробы воздуха следует отбирать только в тех камерах, где по определенным признакам ожидается повышенное газовыделение.

После производства взрывных работ наборщик проб, включившись в изолирующий респиратор, приступает к отбору проб на исходящей струе камеры, причем пробы берутся с интервалом 10—15 мин до окончательного проветривания забоя (обычно 8—12 прб). Сравнение сухого и мокрого способов наборов проб, выполненное на Соликамском руднике, показало, что следует пользоваться мокрым способом, дающим наиболее точный результат.

Замер количества воздуха выполняется одним из известных способов в зависимости от конкретных условий.

Объем газов, выделившихся в камере после взрыва, рассчитывается по формулам (10). Количество метана и водорода определяется отдельно с последующим приведением к условному метану:

$$q_{\text{усл. СН}_4} = \Sigma q_{\text{СН}_4} + 2\Sigma q_{\text{H}_2}, \text{ м}^3. \quad (22)$$

Ввиду того что концентрация горючих газов в исходящих струях невелика, точность анализа проб должна быть не менее 0,01%.

Число необходимых наблюдений, как показала обработка материалов исследований по газопроявлениям, определяется по методу малой выборки по формуле

$$n = \frac{\omega^2}{p^2} t^2, \quad (23)$$

где ω — коэффициент вариации; p — величина допустимой ошибки; t — нормированное отклонение при 95% уверенности ($t=2$) и величине допустимой ошибки 20%.

Число наблюдений

$$n = \frac{59,4^2 \cdot 2^2}{20^2} = 36.$$

Согласно методике определения газообильности угольных шахт, категория шахты должна устанавливаться не менее одного раза в год. На калийных рудниках газовыделения носят более стабильный характер (практически отсутствуют выделения газов из выработанного пространства, отсутствует зависимость увеличения газовыделений от глубины разработки и пр.), поэтому нет необходимости проводить ежегодные газовые съемки. По нашему мнению, объемы горючих газов следует определять через 3—5 лет, а также в случаях, когда очистные работы ведутся в тех частях шахтных полей, которые имеют существенные отличия в геологическом строении (тектонические нарушения, смятия, увеличение мощности наиболее газоносных слоев и пр.) от ранее разрабатываемых.

На основании наблюдений устанавливается коэффициент неравномерности газовыделений

$$k_n = \frac{q_{\max}}{q_{\text{ср}}}, \quad (24)$$

где q_{\max} — максимальный объем газовыделения в камере из всех наблюдений, м³; $q_{\text{ср}}$ — среднеарифметический объем газовыделения из всех наблюдений, м³.

При определении объема горючих газов, выделяющихся за одно взрывание в камере, и коэффициента неравномерности не следует учитывать крупные внезапные выбросы газа, объем которых измеряется сотнями и тысячами кубических метров, поскольку такие выделения не превышают 10% общего числа газовыделений и не могут служить основанием для расчета количества воздуха.

Режим проветривания камер с крупными газовыделениями должен определяться в каждом конкретном случае руководством рудника (главным инженером или начальником вентиляции). Остальные требования газового режима, предъявляемые к угольным шахтам (применение предохранительных ВВ, использование электроаппаратуры во взрывобезопасном исполнении и пр.), в равной степени должны выполняться на газовых калийных рудниках.

§ 5. Мероприятия по борьбе с газами на рудниках*

Весь комплекс мероприятий по борьбе с природными газами разделяется на следующие три группы:

1) меры по предотвращению образований в подземных выработках опасных скоплений газа;

* В данном параграфе вопросы борьбы с газодинамическими явлениями не рассматриваются.

2) меры по предупреждению воспламенения скопившегося газа;

3) меры по локализации взрыва и уменьшению числа его жертв.

Меры по предотвращению образований в подземных выработках опасных скоплений газа сводятся к контролю за составом рудничной атмосферы и организации надлежащего проветривания очистных и подготовительных забоев и рудников в целом.

Правила безопасности требуют, чтобы содержание горючих газов в исходящей струе рудников не превышало 0,75%, в исходящей струе действующих забоев и крыльев 1% условного метана ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$). При содержании условного метана 1% и более ведение взрывных работ запрещается.

На рудниках Южного Гарца работы прекращаются при содержании горючих газов (метана и этана) 0,5%. Уменьшение нормы вдвое объясняется тем, что нижний предел взрываемости этана почти в 2 раза ниже метана (2,5—4,2 вместо 5,3—6,2%).

Контроль за содержанием горючих газов на рудниках осуществляется шахтными интерферометрами ШИ-3, «Рикен» (Япония), индикаторами «Рингроз» (Англия). Интерферометры используются при замере смеси газов, состоящих из метана и углекислого газа или водорода и углекислого газа. Вследствие одинаковой оптической плотности водорода и метана, но противоположной по знаку, интерферометр ШИ-3 нельзя использовать для контроля атмосферы, содержащей метан, углекислый газ и водород.

В настоящее время прошел промышленные испытания газоанализатор ГИК-1, разработанный ВостНИИ на базе интерферометра ШИ-3. Прибор снабжен специальной колонкой, заполненной металлическим палладием на носителе для поглощения водорода, что позволяет замерять содержание каждого из перечисленных газов в отдельности.

Раздельное определение содержания метана, водорода и углекислого газа складывается из нескольких операций. Вначале определяется содержание метана (исследуемый воздух при этом освобождается от водорода и углекислого газа), затем — водорода (с освобождением пробы от углекислого газа) и, наконец, — углекислого газа. При определении концентрации водорода и углекислого газа производят компенсацию предыдущего замера поворотом микровинта. Пределы измерений газов: метана, водорода и углекислого газа по 0—6%, метана в сумме с углекислым газом 0—6%, метана в сумме с водородом 0—12%. Допустимая погрешность при определении указанных газов $\pm 0,3\%$. Время одного замера 1 мин.

Индикатор «Рингроз» обычно тарируется таким образом, чтобы загорание его сигнальной (красной) лампочки происходило при концентрации горючих газов 1% и выше. Чем быстрее загорается сигнальная лампочка, тем выше содержание горючих газов в ат-

мосфере. Это позволяет приблизительно оценить состав рудничной атмосферы и степень ее опасности.

Установлен следующий порядок контроля содержания горючих газов. При разработке карналлитовых пластов газ замеряют перед допуском рабочих в забой, перед заряданием шпуров и непосредственно перед взрыванием. После взрывных работ замеряют содержание газов в забое, у горловины камеры, у вентиляторов местного проветривания и пусковой аппаратуры. В остальных рабочих камерах, где производят погрузку полезного ископаемого и другие работы, содержание газа замеряют через каждые 2 ч. Результаты замеров заносят на доску и в специальную книгу.

Отбор проб для производства химического анализа на водород, метан, кислород и углекислый газ в действующих забоях карналлитовых пластов выполняют ежемесячно, независимо от показания индикатора. Кроме указанных проб три раза в месяц отбирают плановые пробы из каждого забоя и на исходящих струях отдельных блоков и участков.

В забоях, разрабатывающих сильвинитовые пласты, содержание газа в выработках замеряют перед началом работ, перед заряданием и взрыванием. В камерах и подготовительных забоях, где производят погрузку, содержание газа замеряют через каждые 3 ч. Отбор проб для лабораторного анализа на сильвинитовых пластах осуществляют при обнаружении горючих газов в забоях концентрацией более 1%, а также один раз в месяц отбирают плановые пробы.

Проветривание очистных и подготовительных забоев в газовых рудниках регламентировано Правилами безопасности, согласно которым газовый режим распространяется только на отдельные газовые пласты или залежи, а не на рудник в целом.

Участки, разрабатывающие газовые пласты (залежи), должны иметь обособленное проветривание. Подготовительные выработки при проходке и действующие забои тупиковых камер на газовых пластах проветриваются с помощью вентиляторов местного проветривания, работающих на нагнетание. Применение отсасывающих вентиляторных установок запрещено. К всасу нагнетательного вентилятора должна подаваться струя свежего воздуха за счет общешахтной депрессии. При проветривании карналлитовых камер вентиляторы местного проветривания располагают либо у скважин, соединяющих выемочный штрек с откаточным, либо у воздухоподающих гезенков.

Количество воздуха, необходимого для проветривания газовых пластов, в зависимости от категории рудника соответственно составляет для рудников I категории 1,4, II — 1,75, III — 2,1 м³/мин на 1 м³ среднесуточной добычи горной массы, а для сверхкатегорных подается из такого расчета, чтобы в общей исходящей струе содержание горючих газов не превышало 0,75%, но было не менее 2,1 м³/мин на 1 м³ среднесуточной добычи горной массы.

Количество воздуха, необходимого для проветривания участка, рассчитывают по формуле

$$Q = \frac{D}{\gamma} q_n, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (25)$$

где D — среднесуточная добыча горной массы на участке, т; γ — плотность горной массы, т/м³; q_n — количество воздуха, подаваемого по нормам в зависимости от категории рудника, м³/мин.

Общее количество воздуха, необходимого для проветривания рудника в целом, опасному по газам, находят суммированием значений количеств воздуха, необходимого для проветривания всех газовых участков.

Изложенная методика расчета заимствована из старой практики нормирования количества воздуха для угольных шахт. В настоящее время расчет количества воздуха для угольных шахт ведется не по относительной, а по абсолютной газообильности, при этом учитывается потребность в воздухе каждого забоя.

Кафедрой охраны труда и рудничной вентиляции Пермского политехнического института разработан позабойный метод расчета количества воздуха для калийных рудников, который учитывает специфику горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождений. Количество воздуха для проветривания забоев на газовых рудниках по этой методике рассчитывается аналогично расчету количества воздуха по ядовитым газам, образующимся при взрывных работах.

При разработке газовых пластов камеры проветриваются одной нагнетательной установкой, поэтому количество воздуха, необходимого для проветривания, предлагается определять:

а) при длине камеры $L > 2,5L_{\text{пр}}$ по формуле

$$Q = \frac{k_y V_B}{t_{\text{пр}}} \lg \frac{160 Q_{\text{взр}} k_{\text{II}}}{V_{\text{пр}}}, \text{ м}^3/\text{мин}; \quad (26)$$

б) при длине камеры $L \leq 2,5L_{\text{пр}}$ по формуле

$$Q = \frac{k_y \varphi V_B}{t_{\text{пр}}} \left(3 + \lg \frac{0,2 Q_{\text{взр}} k_{\text{II}}}{V_{\text{пр}}} \right), \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (27)$$

где $L_{\text{пр}}$ — расстояние от конца нагнетательного трубопровода до забоя, м; k_y — коэффициент, учитывающий утечки воздуха в нагнетательном трубопроводе длиной l , определяемый по формуле

$$k_y = 1 + 0,002l.$$

V_B — проветриваемый объем, равный произведению длины камеры Z на площадь ее сечения S , м³; $t_{\text{пр}}$ — расчетное время проветривания, мин; $Q_{\text{взр}}$ — объем горючих газов, выделяющихся при взрывных работах, м³; $V_{\text{пр}}$ — объем призабойной зоны, м³, φ —

коэффициент, учитывающий влияние площади поперечного сечения камеры,

$$\varphi = \frac{0,85}{S}.$$

Объем горючих газов, выделяющихся при взрывных работах, и коэффициент неравномерности газовыделений устанавливаются на основе газовых съемок по методике, изложенной в книге [15].

Количество воздуха, необходимого для проветривания всех рабочих камер добычного участка, разрабатывающих газовый пласт,

$$Q_{\text{уч.г}} = k_p Q_{\text{г}}, \quad (28)$$

где $k_p = 1,5 \div 1,2$ — коэффициент запаса, учитывающий добавочное количество воздуха для предотвращения рециркуляции при проветривании тупиковых камер; $Q_{\text{г}}$ — сумма количеств воздуха, необходимого для проветривания всех рабочих камер на участке, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Общее количество воздуха, необходимого для проветривания всех добычных участков, разрабатывающих газовые пласты (залежи),

$$Q_{\text{общ}} = \Sigma Q_{\text{уч.г}}, \quad \text{м}^3/\text{мин}. \quad (29)$$

Многолетними наблюдениями установлено, что при ведении взрывных работ по карналлитовому пласту В Верхнекамского месторождения (наиболее газоносному из всех разрабатываемых в настоящее время пластов) газовыделения условного метана редко превышают 100 м^3 . С точки зрения проветривания, 1 кг ВВ эквивалентен 5 м^3 условного метана. Следовательно, если объем условного метана, выделившегося после взрывания, удовлетворяет неравенству $q < 5B$, где B — количество одновременно взрываемого ВВ (кг), то фактором, определяющим потребность воздуха для проветривания рабочих камер, является расход ВВ, в противном случае (при $q > 5B$) — горючие газы. Расход ВВ в очистных забоях за одно взрывание, как правило, превышает 20 кг, поэтому расчет количества воздуха необходимо вести по фактору «расход ВВ». Приведенные выше формулы должны быть использованы для проверочных расчетов.

При проведении очистных и подготовительных выработок с помощью комбайнов и буровзрывным способом характер газовыделений и объем выделяющихся газов имеют существенные различия. Скорость проведения выработок комбайнами значительно выше скорости проходки выработок буровзрывным способом. Это может привести к более интенсивным (во времени) газовыделениям и к появлению более высоких концентраций горючих газов за счет выделения их с обнаженных поверхностей массива и из разрушенной горной массы.

Максимальная длина выработки, подлежащая проветриванию, определяется по скорости подвигания комбайна и по полному периоду дренирования обнаженной поверхности (определяемому опытным путем).

Количество воздуха, необходимого для разбавления и выноса горючих газов при проведении выработок комбайном, исходя из двухсоткратного разжижения (до 0,5%), равно

$$Q = 3,34q_0k_nk_kk_b, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (30)$$

где $k_n=1,75$ — коэффициент неравномерности газовыделений; $k_k=1,50$ — коэффициент неравномерности работы комбайна; $k_b=1,40$ — коэффициент, учитывающий наличие водорода в выделяющемся газе.

Значения этих коэффициентов установлены на основании обработки материалов наблюдений по пласту Красному II Верхнекамского месторождения. Для других пластов (залежей) они должны определяться опытным путем.

Общее количество воздуха, необходимого для проветривания всех добычных участков, разрабатывающих газовые пласты с помощью комбайнов, определяется суммированием количества воздуха для каждого забоя и умножением на коэффициент k_y , учитывающий утечки воздуха.

Для обеспечения действующих забоев необходимым количеством воздуха важно, чтобы схемы проветривания рабочих блоков и добычных участков были независимыми (для облегчения задачи регулирования воздушными потоками), а утечки воздуха — минимальными.

Меры по предупреждению воспламенения скопившегося газа сводятся главным образом к предотвращению возможности появления открытого огня в горных выработках. С этой целью запрещается курить в рудниках и проносить спички, не допускается использовать карбидные и бензиновые светильники, предусматривается целый ряд ограничений и предосторожностей при использовании электроэнергии в эксплуатации электрооборудования.

Согласно Правилам безопасности при разработке залежей, опасных по внезапным выбросам полезного ископаемого и газа и сульфурным выделениям, разрешается применение только аккумуляторных электровозов. Откатка контактными электровозами допускается на рудниках I и II категории по газу по главным откаточным выработкам, омываемым свежей струей воздуха.

Запрещается ремонтировать электрооборудование и электрические сети, находящиеся под напряжением, открывать оболочки взрывобезопасного электрооборудования без предварительного замера газа, если при этом голые токоведущие части находятся под напряжением.

Взрывные работы на угольных шахтах, опасных по газу, являются одной из причин воспламенения горючих газов в забоях.

Поэтому при взрывных работах применяют исключительно предохранительные ВВ. Патроны снабжаются предохранительными оболочками (в особенности при ведении работ по углю), в состав которых входит поваренная соль, обладающая, как известно, пламегасящими свойствами.

Соляная пыль, образующаяся в больших количествах при ведении взрывных работ на калийных рудниках, противодействует воспламенению.

Наблюдения, проведенные с целью установления возможности применения на каменносоляных рудниках, опасных по метану, предохранительных ВВ, показали, что при концентрации метана в забое 9,5% и взрывании зарядов в шпурах длиной от 0,2 до 1,4 м не было ни одного случая воспламенения или взрыва газа.

Исследования по изучению пламегашения метано-водородной смеси пылью, насколько нам известно, пока не проводились. Поэтому при ведении взрывных работ в карналлитовых и сильвинитовых пластах руководствуются Правилами безопасности для угольных шахт, опасных по метану. Кроме того, выполняются дополнительные меры. Непосредственно перед взрыванием обесточивается силовая и осветительная магистрали всего участка. Электроэнергия на участке включается только в том случае, если после проведения взрывных работ и осмотра забоя будет установлено, что электросеть исправна, а содержание взрывчатых газов вблизи пусковой аппаратуры и вентиляторов меньше 1%.

Чтобы избежать заполнения забоев, намеченных к взрыванию, газами от предыдущих взрывов в других забоях взрывание должно начинаться с наиболее удаленного забоя (от места входа поступающей струи) с таким расчетом, чтобы в каждый последующий взрываваемый забой (камеру) поступал свежий воздух.

Меры по локализации взрыва и уменьшению числа его жертв. Наибольшее количество газов, как отмечалось ранее, выделяется на калийных рудниках в момент ведения взрывных работ. Максимальные объемы газовыделений, зафиксированных на отечественных рудниках, достигают 2000 м³ условного метана (Солн-камский рудник). Несмотря на то, что такие крупные газовыделения довольно редки, они представляют большую опасность, так как выделившиеся газы могут распространиться за пределы рабочей камеры и заполнить прилегающие выработки.

Чтобы предотвратить распространение продуктов взрыва на соседние рабочие блоки или участки, проветривание последних осуществляется обособленными струями за счет работы главного вентилятора, для чего вентиляционная сеть выработок разделяется на возможно большее число независимых вентиляционных ветвей.

Перед проведением взрывных работ по карналлиту все люди выводятся за пределы рабочей зоны, например на откаточный или транспортные штреки. Во время взрывания взрывники должны находиться на свежей струе за пределами участка.

На рудниках ГДР и ФРГ, опасных по внезапным выбросам газа, взрывание производят только между сменами, когда в подземных выработках отсутствуют люди. При этом взрывник находится на поверхности или в камере — убежище. Более подробные сведения по борьбе с внезапными выбросами изложены в главах V и VI.

Все рабочие калийных рудников проходят инструктаж, на котором знакомятся со свойствами газов, выделяющихся в выработки, мерами предосторожности при работе, а также со способами самоспасания и спасания товарищей. Рабочие снабжаются самоспасателями и обучаются способу обращения с ними. Каждый калийный рудник СССР обслуживается военизированным горноспасательным подразделением.

Благодаря выполнению всего комплекса мероприятий по борьбе с газами на отечественных рудниках в последние годы не было зафиксировано ни одной крупной аварии, вызванной вспышкой или взрывом газа.

Глава IV

ВНЕЗАПНЫЕ ВЫБРОСЫ СОЛИ И ГАЗА

§ 1. Характеристика выбросов

Внезапные выбросы соляных пород и газов происходили и происходят на ряде отечественных и зарубежных калийных рудников.

На Верхнекамском месторождении, начиная с момента разработки карналлита, т. е. с 1933 г., газодинамические явления постоянно сопутствуют проходческим и очистным работам. Как показали визуальные наблюдения, при внезапных выбросах неожиданно по времени и месту возникновения происходят мгновенные разрушения и смещения масс карналлита в сторону выработки, иногда с прорывом кровли пласта с одновременным выделением значительных количеств газа и с характерным строением стенок образовавшейся полости. Сила выбросов различна и последствия их также неодинаковы. Например, 15 февраля 1937 г. в камере 9 карналлитового пласта Соликамского рудника произошел выброс породы и газа со вспышкой газа. В результате выброса разрушилось электрооборудование, лебедки, сотрясением воздуха были разбиты колпачки осветительной арматуры, обуглились деревянные пробки и фанерные трубы.

28 декабря 1939 г. произошел внезапный выброс карналлита и газа из кровли и целиков камеры 21 блока 7 Соликамского рудника. Выемка карналлита в камере производилась потолкоступным забоем. Вначале камера отсекалась выработкой шириной 4 и высотой 2 м, а затем производилась выемка уступами. К моменту выброса был отбит нижний слой по длине камеры. За 1 ч до выброса был произведен замер газа в камере. Газ обнаружен не был. За 25 мин до выброса начальник смены осматривал камеру и никаких признаков предстоящего выброса не обнаружил.

Выброс сопровождался сильным шумом и сотрясением воздуха. Входы в камеру с обеих ее сторон были засыпаны породой. Участок был полностью загазирован. Анализ проб воздуха, взятых на исходящей струе участка, показал наличие горючих газов:

метана 0,5% и водорода 1,3%. Длина полости выброса 45, ширина 8 и высота 13 м. Выброшенный карналлит имел чешуйчатый, пластинчатый и пылеобразный вид.

17 июля 1961 г. в камере 30 блока 3 во время взрывания произошёл выброс карналлита, сопровождавшийся выделением около 2000 м³ горючих газов (метана и водорода). Содержание водорода в камере после проветривания составляло 45,2%, метана 12,1%, кислорода 1,6%. В результате загазирования работы в забое были приостановлены на 7 сут.

Крупные внезапные выбросы карналлита и газа, которые происходят на Верхнекамских рудниках, довольно редки. Чаще они имеют значительно меньшую силу и менее тяжёлые последствия. Выбросы происходили при выемке карналлита отбойными молотками, при применении врубовых машин и при взрывной отбойке. Во всех случаях выбросы проявлялись одинаково, однако при выемке карналлита отбойными молотками они происходили значительно реже, чем при взрывных работах. В настоящее время выемка карналлита осуществляется буровзрывным способом и выбросы бывают только в момент взрывания.

При выбросах порода смещается из стенок выработок (междукамерных целиков) и кровли, часто затрагивая целик и кровлю и реже почву (рис. 23). Так, разрушения почвы при некоторых выбросах карналлита произошли, например, в камерах 7, 8, 12, 20



Рис. 23. Полость, образованная в результате выброса соли и газа из стенки камеры

блока № 7 Соликамского рудника. Карналлит в почве расслоился, но остался на месте. Он легко вынимался на глубину до 1 м.

Полости, образовавшиеся после выброса соли, бывают самой

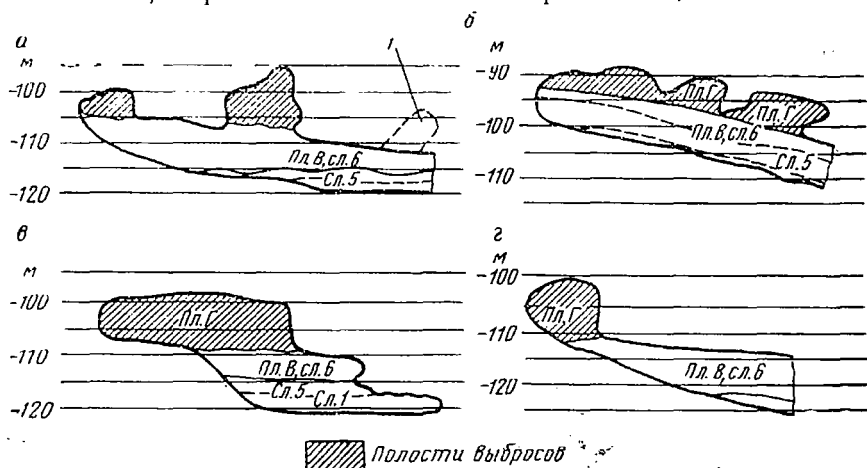


Рис. 24. Формы полостей, образованных в результате выбросов, в камерах карналлитового пласта В Соликамского рудника (вертикальный разрез): а — камера 15, блок 15; б — камера 21, блок 15; в — камера 23, блок 45; г — камера 5, блок 15

различной формы (рис. 24). При выбросах из кровли часто образуются полости, имеющие в верхней части скругленную форму и называемые «куполами» (рис. 25). Размеры полостей бывают

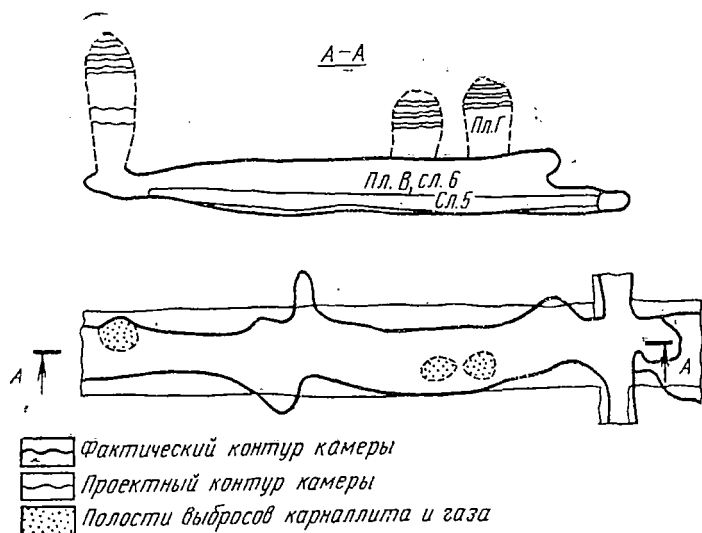


Рис. 25. Купола, образовавшиеся в результате выбросов из кровли камеры 3 блока 15 Соликамского рудника

различными: от 0,5 до 30 м в диаметре и от 0,5 до 26 м глубиной.

Стенки полостей имеют характерную трещиноватость. Выделяют три вида трещин: послойные, радиальные и концентрические. Послойные трещины направлены параллельно напластованию. Расстояние между трещинами по краям полости выброса колеблется от 1 до 5 см и более, а к центру оно уменьшается до 0,1 см и менее. Трещины прослеживаются на глубину до 50 см. Поверхность стенок трещин блестящая.

Радиальные и концентрические трещины направлены перпендикулярно послойным. Поверхности этих двух видов трещин имеют вид разлома, без заметных следов скольжения.

Разрушенная масса карналлита во всех случаях состояла из комков различной величины, чешуек и пыли.

Известны случаи запоздалых выбросов карналлита. Спустя длительное время после сотрясательного взрывания произошло несколько выбросов в камере 20 и штреке 20 блока 7 объемами по несколько сотен тонн. Выбросы произошли из вышележащего карналлитового пласта Г в местах, где каменная соль пласта В—Г была разорвана.

Все выбросы карналлита сопровождалась выделениями газа в различных количествах. Один из самых крупных выбросов соли и газа произошел 28 декабря 1939 г. При этом только в течение первого часа выделилось около 1 м³ газа на 1 т выброшенной породы. Общее количество выделившегося газа не было определено. Наиболее крупное из замеренных количество газа составило 2000 м³. Выброс сопровождался сильным шумом и воздушным толчком с резким охлаждением воздуха, от расширения газа, находящегося ранее под давлением.

Выбросы соли и газа, как отмечалось ранее, происходят на Втором Березниковском руднике, разрабатывающем только сильвинитовые пласты А—Б и Красный II, залегающие примерно на 100 м глубже, чем на шахтных полях Соликамского и Первого Березниковского рудников. Эти выбросы происходят из вмещающих пород пластов Красного II и А—Б. Наиболее крупные выбросы захватывали толщу пород вплоть до карналлитового пласта Г. На Втором Березниковском руднике выбросы по своему характеру отличаются от описанных выше, так как в большинстве случаев они сочетаются с обрушением кровли. Зарисовка места такого газодинамического проявления приведена на рис. 26.

Сдвижение породхватило пласты Б—В, В, В—Г и Г. Одновременно произошло выделение газа. В пробе, взятой через 1 ч 10 мин после обрушения на исходной струе камеры (в 240 м от места обрушения), при непрерывной работе вентилятора местного проветривания было обнаружено 0,95% метана. Обрушенная порода находилась под образовавшейся полостью. Тонкослоистые породы непосредственной кровли выработки (представленной каменной солью с частым чередованием тонких глинистых

прослоев) разрушались в виде плит, ограниченных по плоскостям глинистыми прослоями и расколотых на куски размерами 20—30 см и более. Для карналлитовой породы характерно мелкое дробление и пыль. Осмотр стенок полостей показал, что в данных

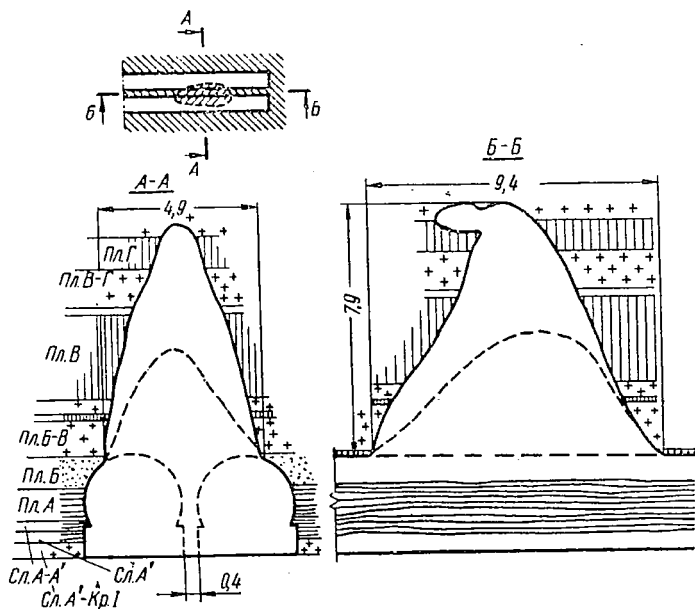


Рис. 26. Зарисовка места обрушения и внезапного выброса в центральном и правом ходах камеры 25, пройденной комбайном ПК-8 по пласту А—Б. Объем разрушенной породы 136 м

случаях, по-видимому, имели место обрушения нижних слоев породы пласта Б—В с одновременным выбросом карналлита из пластов В и Г.

Выбросы каменной соли и газа, приуроченные к моменту взрывания, имеют место и на Индерском месторождении калийных солей. Объемы происшедших выбросов незначительны при проведении выработок небольшого сечения (около 4,5 м²), размеры полостей и объемы газовойделений невелики. Объемы газов, выделяющиеся при выбросах на Индерском месторождении, не замерялись. Времени, отводимого для проветривания забоя после взрыва (30 мин), оказывалось достаточно, чтобы концентрация горючих газов в забое была снижена до безопасных пределов.

Наибольшей силой характеризуются внезапные выбросы, сопровождающиеся выделением углекислого газа. Выбросы, сопровождающиеся выделением углеводородов, обладают меньшей силой.

Большинство калийных рудников, работающих в настоящее

время в ГДР, эксплуатируется около 60 лет. На ряде рудников калийного бассейна Верра происходят выбросы соли и углекислого газа.

Рудник «Менценграбен» эксплуатируется с 1916 г., разрабатывается карналлит и сильвинит. Пласты, залегающие горизонтально или слегка волнисто, сильно нарушены. Мощность сильвинитового пласта в среднем 3 м, мощность карналлитового пласта в куполах 35 м. Карналлит большей частью трещиноватый.

Из общего числа (более 950) внезапных выбросов соли и углекислого газа в бассейне Верра больше всего и наиболее тяжелые произошли на руднике «Менценграбен». Первый внезапный выброс углекислого газа и 60 т карналлита произошел при проведении штрека. Второй выброс произошел также при проведении штрека, когда вместе с углекислым газом было выброшено 80 т сильвинита.

При проведении штреков в подстилающей каменной соли выбросов не было. В период с 1940 по 7 июля 1953 г. на шахте произошло 14 крупных выбросов соли и углекислого газа объемом выброшенной породы от 600 до 18 000 т. Все они были приурочены к зоне перехода хартзальца в карналлит.

Самый крупный выброс соли и углекислого газа произошел на руднике «Менценграбен» 7 июля 1953 г. Взрывные работы на руднике «Менценграбен» осуществляются с поверхности при полном отсутствии людей под землей. После серии взрывов произошел выброс углекислого газа небывалой силы. Углекислый газ, заполнивший воздухоподающий ствол, пробил в железобетонном перекрытии надшахтного здания отверстие площадью около 10 м². Шум, сопровождающий прорыв газа, был подобен шуму при одновременном выпуске пара из 4 или 5 паровозов, были слышны грохочущие звуки. Шум длился примерно 25 мин. За сравнительно короткое время участок поверхности протяженностью около 5 км был заполнен углекислым газом. Горные выработки были заполнены газом почти полностью. Общее количество выброшенного углекислого газа составила около 700 тыс. м³.

Установлено, что газ под большим давлением выбрасывался в течение 25 мин через воздухоподающий ствол. Ствол был сильно поврежден.

Кроме того, была разрушена большая часть вентиляционных перемычек, повреждена электрическая осветительная сеть и часть силовых кабелей, рельсовые пути и вагонетки, скреперные лебедки, находившиеся вблизи очага внезапного выброса. Из-за этих повреждений рудник простоял около 12 недель.

Размеры полости выброса, по предварительной оценке, составили в длину около 60 м, ширину 12—15 и высоту 6—12 м. Количество выброшенной соли составило 65 тыс. т. Выброс произошел из забоя выемочного штрека, который проводили по чистому карналлиту. Полость выброса проникла в глубь кровли, представленной каменной солью. На контакте карналлита с каменной

солью выбросом был обнажен преобразованный сильвинит, являющийся носителем растворенного углекислого газа.

Кроме выбросов соли и углекислого газа в ГДР на калийных рудниках Южного Гарца происходят выбросы соли и углеводородных газов. Внешнее проявление тех и других выбросов одинаково, однако последние обладают значительно меньшей силой. При самом крупном выбросе на руднике «Томас Мюнцер» было выброшено около 1,5 тыс. т соли. Замеры давления газа в карналлитовом пласте показали, что оно соответствовало гидростатическому для данной глубины.

§ 2. Последствия внезапных выбросов

В СССР внезапные выбросы соли и газа имеют место, как уже отмечалось, на Верхнекамском, Старобинском, а также на Индерском месторождениях. На Соликамском и Первом Березниковском рудниках эти явления проявляются практически при работе в каждой камере и выработке карналлитового пласта. По данным Ф. Ф. Пермякова, на участке № 8 выбросами сопровождалось 27% всех взрывов со средним объемом выброшенной породы 97 м³, а на участке № 9 — 39% всех взрывов со средним объемом породы 26 м³. Ф. Ф. Пермяков объясняет это различие неодинаковым строением карналлита на участках. По данным В. П. Шатова [28], проводившего наблюдения, на Первом Березниковском руднике происходит в среднем 110 выбросов в год, на Соликамском — 550. По данным нашего анализа материалов газоаналитической лаборатории горноспасательного взвода ежегодно по Соликамскому руднику регистрируется около 600—800 случаев загазирования рабочих забоев после взрыва. За четыре года работы на Втором Березниковском руднике произошло около 50 случаев обрушений и выбросов. Выбросы соли и газа имеют место на всех действующих Солигорских рудниках.

Осложнения, возникающие в результате внезапных выбросов, можно охарактеризовать следующим образом.

Неожиданные выбросы масс горной породы, достигающие нескольких сотен тонн, представляют большую опасность для людей и механизмов, находящихся в забое. Вследствие этого в настоящее время затруднено или невозможно применение многих высокопроизводительных машин и механизмов.

Из-за внезапных выбросов нарушаются проектные параметры систем разработки (рис. 27), ширина и высота камер и междукамерных целиков, а также сплошность непосредственной кровли камер. Распространение куполов в вышележащие породы создает предпосылки для прорыва агрессивных вод и рассолов, что недопустимо в условиях калийных рудников. Уменьшение опорной площади междукамерных целиков требует введения в целики дополнительного запаса прочности, вследствие чего потери полезного ископаемого увеличиваются.

Нами определены фактические отклонения ширины карналлитовых целиков и камер от проектной (соответственно равной 19 и 8 м) по плану горных работ путем планиметрирования площадей камер нескольких блоков пласта В Соликамского рудника.

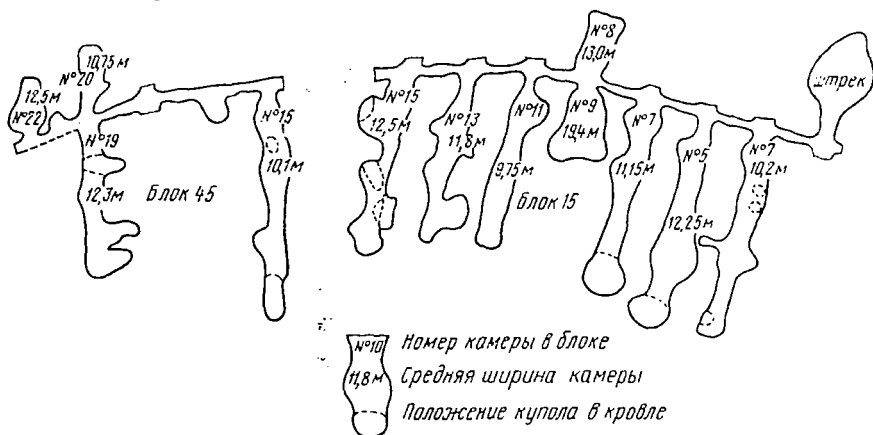


Рис. 27. Выкопировка из плана горных работ двух блоков Соликамского рудника

В результате обработки этих данных получена фактическая средняя ширина каждой камеры.

Минимальная фактическая ширина камер 14 и 21 блока 43 равна 8,5 м, а максимальная 29,4 м (камера 9 блок 15). Увеличение ширины камеры по сравнению с проектной составило от 6,2 до 143%. Средняя ширина камер по блокам 15, 41, 43, 45 и 75 составила 10,2 м, т. е. на 2,2 м была больше проектной. Примерно такое же положение наблюдается по всем блокам шахтного поля [4].

Нередки случаи, когда из-за слишком резких отклонений фактических параметров камер и целиков от проектных приходится оставлять неотработанными подготовленные к выемке запасы карналлита (см. рис. 27), что не только увеличивает и без того огромные потери полезного ископаемого в недрах, но и требует наличия резервных очистных забоев и значительно снижает производительность труда.

Загазирование атмосферы рабочих камер делает ее взрывоопасной и непригодной для дыхания, а поэтому требует организации специального вентиляционного режима. Длительные, измеряемые сутками и сменами, простои при загазировании камер также требуют наличия дополнительных очистных забоев для обеспечения производственного плана по добыче карналлита.

Наиболее крупные внезапные выбросы наносят повреждения выработкам, а в отдельных случаях и оборудованию, на восстановление которых требуются дополнительные материальные и трудовые затраты. Работы по оборке стенок полостей выбросов,

в особенности куполов, не только непроезжательны, но и часто опасны.

Так, в результате описанного выше тяжелого внезапного выброса соли и CO_2 на руднике «Менценграбен» разрушениям подверглось около 50% вагонеточного парка, много километров кабеля, около 2,5 км двухколейного рельсового пути, три скреперные лебедки, несколько вентиляторных установок местного проветривания, 65% вентиляционных перемычек и т. д.

В результате выброса, зарегистрированного 23 сентября 1962 г. в камере 27 блока 45 Соликамского рудника, произошел взрыв горючих газов. Образовавшаяся воздушная волна вызвала частичные разрушения ограждений скреперной лебедки, рудоспускных гезенков и скважин. Кроме того, были сорваны вентиляционные трубы, кабели, воздухоподающие шланги, осветительная арматура.

Внезапные выбросы играют в ряде случаев и положительную роль. При «удачном» выбросе, протекающем без указанных выше отрицательных факторов, может быть получен дополнительный выход полезного ископаемого без затрат труда и материалов, необходимых при буровзрывных работах. При умении управлять этим явлением можно добиться снижения себестоимости 1 т полезного ископаемого.

Таким образом, для обеспечения безопасности работ необходимо разработать мероприятия по предупреждению внезапных выбросов солей и газов или управлению ими.

§ 3. Механизм выбросов

Во всех определениях выброс характеризуется как внезапное разрушение и вынос части массива породы с одновременным выделением значительно большего по сравнению с обычным количества газа и с образованием характерной полости. Это определение подходит и к газодинамическим явлениям, происходящим при разработке калийных месторождений.

Рассмотрим современные взгляды на механизм внезапных выбросов пород и газов.

Большой объем работы по этому вопросу применительно к калийным рудникам проведен в ГДР. Теория механизма внезапных выбросов в 1963 г. была разработана Гиммом и Тома и дополнена исследованиями Экарта и Маргграфа. Согласно этой теории, внезапный выброс соли и газа — горномеханический процесс. В массиве соляной породы, которая находится в трехосном напряженном состоянии, имеются зоны с повышенной газоносностью и пониженной прочностью. При нарушении напряженного состояния такой зоны (нарушении состояния равновесия) происходит выброс (рис. 28). По Гимму и Тома существуют также участки массива, бедные газом (первичная зона на рис. 28), которые играют роль защитной стенки.

При ведении горных работ нарушения равновесия, вызывающие выброс, происходят вследствие сильного ослабления породной стенки, которая имеется между выбросоопасной зоной и выработкой. В этом смысле доминирующая роль взрывных работ в активизации выбросов является случайной.

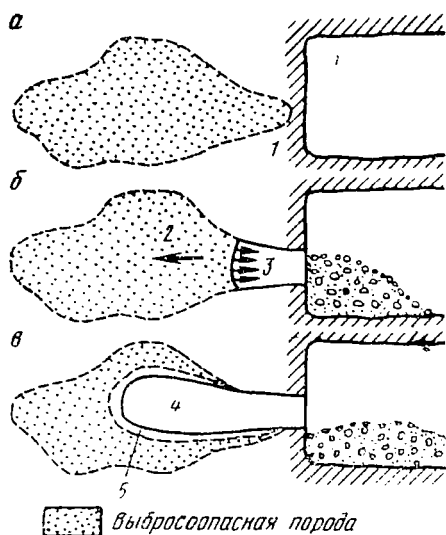


Рис. 28. Схема к теории механизма внезапных выбросов соли и газа по Гимму и Тома:

а — положение до выброса; б — во время выброса; в — после выброса; 1 — первичная неактивная по выбросу зона; 2 — направление распространения фронта выброса; 3 — сила действия активных газов; 4 — полость выброса; 5 — вторичная неактивная по выбросу зона

Выброс имеет форму цепной реакции. Доказательством этому служат данные Вольфа по измерению количества выброшенной соли и газа. Диаграмма на рис. 29 показывает изменение интенсивности выделения газа при внезапном выбросе в зависимости от времени.

Внезапный выброс заканчивается тогда, когда фронт его достигает достаточно бедной газом зоны и одновременно с этим восстанавливается нарушенное механическое равновесие. По данным Экарта и Маргграфа, зоны 5 (см. рис. 28), слабо насыщенные газом, часто образуются во время самого процесса выброса, так как более подвижный газ не успевает вынести с собой из полости выброса всю

породу и образуется дегазированная полоса массива, задерживающая дальнейшее развитие выброса. Затухающая с глубиной трещиноватость стенок полостей выброса (Racheln) подтверждает это представление. Вместе с тем наличие первичных зон, бедных газом (по Гимму и Тома), создает предпосылки для разработки мероприятий по предупреждению внезапных выбросов.

Развязывание внезапного выброса происходит за счет освобождения находящегося в солях межкристаллического и внутрикристаллического газа. Для понимания механизма выброса важно знать, в каком виде находится связанный газ в соли. По этому вопросу нет единого мнения и, по-видимому, практически могут иметь место различные формы нахождения газа в зависимости от его состава и содержания, давления в пласте и генезисе (имеется в виду растворенный или капиллярно абсорбированный внутрикристаллический газ, жидкий или газообразный, свободный или адсорбированный межкристаллический).

Развязывание внезапного выброса происходит за счет освобождения находящегося в солях межкристаллического и внутрикристаллического газа. Для понимания механизма выброса важно знать, в каком виде находится связанный газ в соли. По этому вопросу нет единого мнения и, по-видимому, практически могут иметь место различные формы нахождения газа в зависимости от его состава и содержания, давления в пласте и генезисе (имеется в виду растворенный или капиллярно абсорбированный внутрикристаллический газ, жидкий или газообразный, свободный или адсорбированный межкристаллический).

Так, анализ внезапного выброса, происшедшего на руднике «Менценграбен» 7 июля 1953 г., позволяет предположить, что углекислый газ находится в массиве в жидком состоянии. Углекислый газ переходит в жидкое состояние при температуре 26°C

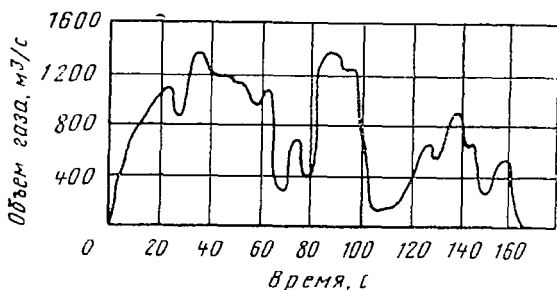


Рис. 29. Изменение во времени интенсивности выделения газа при выбросе, происшедшем на руднике «Менценграбен»

и давлении 67 кгс/см^2 . Температура горных пород и давление на руднике «Менценграбен» были близки к указанным значениям.

Кроме того, расчеты показали [34], что такое огромное количество газа (более 700 тыс. м^3) могло выделиться из дегазированного объема соли только в том случае, если большая часть углекислого газа находилась в жидком состоянии. Количество выделенного газа, отнесенное к 1 м^3 выброшенной соли, составило $26,6 \text{ м}^3$ (при нормальном давлении). Такое количество газа соответствует 163 л жидкого углекислого газа или 391 л газообразного при давлении 50 кгс/см^2 . В первом случае пористость должна составлять 16%, что практически возможно, во втором — 39% (слишком большое значение). Из этих расчетов Рихтер делает заключение, что большая часть углекислого газа находилась в жидком состоянии и, внезапно освободившись, перешла в газообразное.

Однако в условиях других калийных месторождений со специфическими горно-геологическими условиями и генезисом формы нахождения газов в солях могут быть иными.

В Советском Союзе практические и теоретические разработки вопросов, связанных с внезапными выбросами пород и газов, проводились в основном для условий угольных шахт. Поскольку механизм этих явлений на калийных и угольных шахтах имеет большое сходство, целесообразно рассмотреть сущность этих разработок.

Под руководством В. В. Ходота в ИГД им. А. А. Скочинского разработана так называемая энергетическая теория, объясняющая выброс угля внезапным изменением его напряженного состояния, приводящим к быстрому переходу потенциальной энергии угля в кинетическую и к разрушению угля [24].

В начальный момент отброс разрушенного угля совершается под действием свободного газа, находящегося в трещинах. Сорбированный газ при этом играет роль резерва. При достаточно большой степени дробления угля создаются условия для быстрой десорбции газа, количество которого в пласте достигает 90%. Огромная энергия десорбирующегося газа идет на дальнейший отброс газа.

Отброс может произойти и при отсутствии сорбированного газа. Дальность отброса при этом будет невелика. Таким образом, внезапный выброс может произойти и в несорбирующей или слабо сорбирующей породе при наличии свободного газа. Этот случай может характеризовать выбросы некоторых пород.

Г. Д. Ефремов в работе [9] объясняет причины выбросов пород, происходящих на глубоких шахтах Донбасса (иногда эти породы не содержат газа или содержат незначительное его количество). Г. Д. Ефремов считает, что главной причиной внезапных выбросов является перенапряженное состояние пород, превышающее временное сопротивление их сжатию. Оно возникает в результате мгновенного перераспределения местных напряжений вокруг горной выработки при ведении горных работ (и, в частности, взрывных работ). При этом напряжения в момент мгновенного приложения нагрузки на вновь образованный контур выработки достигают величины $6H\gamma$. Все остальные причины выбросов — наличие газа, механические свойства пород и другие — также способствуют или препятствуют внезапному выбросу и объясняются предложенной гипотезой.

В другой работе [10] этого же автора даются подтверждения высказанной гипотезе. В очень крепких породах типа песчаников концентрация напряжений на контуре выработки достигает максимума в значительной близости от забоя (приблизительно 1 м) и может быть замерена инструментально. В более слабых, трещиноватых и мягких породах (уголь, карналлит) зона концентрации напряжений отодвинута вглубь массива на значительное расстояние от обнаженной плоскости забоя, трещины.

В. И. Николиным, Г. Я. Степановичем и другими [17, 21] предложена следующая гипотеза механизма разрушения породы при выбросах. Порода выбросоопасной зоны разрушается в результате разрыва, когда эта зона попадает из состояния всестороннего сжатия в призабойную часть и получает возможность деформироваться в сторону выработанного пространства. Знак напряжения быстро изменяется на обратный, возникает деформация упругого восстановления.

Доказательством того, что порода разрушается от разрыва, авторы работы [21] считают, в частности, мгновенность разрушения (существенные пластические деформации за такой короткий промежуток времени невозможны) и характер разрушения породы при выбросе — образование тонких чешуеобразных пластин и мелких частиц. В этой же работе сформированы условия, при

которых возможно разрушение породы при разгрузке (за счет возникновения напряжений, вызывающих деформации упругого восстановления):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\epsilon_{ост}}{\epsilon_{упр}} &> 1; \\ \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{min} &< \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{opt} < \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{max}; \\ X_{II} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} &\geq \left[\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \right], \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

где $\epsilon_{ост}$ — относительная пластическая деформация; $\epsilon_{упр}$ — относительная упругая деформация при разгрузке породы из состояния трехосного сжатия; $\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{min}$ и $\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{max}$ — скорости деформирования, характеризующие напряженные состояния, снятие которых не приводит к разрушению при разгрузке; $\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{opt}$ — оптимальная скорость прироста пластических деформаций при трехосном сжатии, необходимая для разрушения при разгрузке; X_{II} — показатель хрупкости; $\left[\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \right]$ — предельное значение показателя хрупкости.

Относительная пластическая деформация рассчитывается по формуле

$$\epsilon_{ост} = \frac{\sigma_{сж}}{E_{сж}} - \frac{\sigma_{сж}}{E_p}, \quad (32)$$

$\sigma_{сж}$ — снимающие напряжения, кгс/см²; $E_{сж}$ — модуль деформируемости при сжатии, кгс/см²; E_p — модуль деформируемости при разгрузении, когда проявляются деформации упругого восстановления (деформации при растяжении), кгс/см².

И. В. Бобров считает основной причиной выбросов пород рядку сохранившихся в песчанике повышенных напряжений, которые накопились в них вследствие тектонических процессов.

Некоторые исследователи связывают динамические явления в шахте с повышенными тектоническими напряжениями на отдельных участках земной коры. Так, например, Н. Е. Волошин и В. И. Тарасьев, основываясь на результатах экспериментальных исследований, считают, что аномально высокая напряженность выбросоопасных участков пород появляется в результате действия тектонических сил в плоскости напластования. Выбросоопасные породы, обладающие по сравнению с окружающими наибольшей упругостью и хрупкостью и наименьшей прочностью накапливают потенциальную энергию. Реализация этой энергии в определенных условиях может привести к разрушению и отбросу породы. Так, при ведении взрывных работ в прилегающем к поверхности забоя участке массива происходит перераспределение напряжений, приводящее к очень быстрому образованию зоны

разгрузки. Эта зона на некотором расстоянии от поверхности забоя ограничивается поверхностью наибольших касательных напряжений, по которой и происходит разрушение породы в виде сдвига. Поверхность наибольших касательных напряжений направлена выпуклостью в сторону массива, поэтому отрыв породы при выбросе происходит в виде выпукло-вогнутых пластин. Процесс повторяется до тех пор, пока не встретится более пластичный или прочный участок породы или пока ранее разрушенная порода, оставшаяся в полости, не окажет тормозящего действия на процесс разрушения и отброса породы.

Результаты измерения напряжений в выбросоопасных песчанниках на шахте «Щегловка-Глубокая» показали, что значение вертикальной составляющей напряжений превышает расчетное в 2,4 раза, а горизонтальной — в 13,7 раза, причем горизонтальная составляющая оказалась на 28 и 43% больше вертикальной. Аналогичные результаты были получены этими авторами и на шахте «Кочегарка».

В связи с изложенными выше взглядами на механизм выбросов приведем некоторые данные из теории разрушения горных пород, разработанной Квапилом [36]. По этой теории все естественные разрушения горных пород можно разделить на три группы:

- 1) без образования трещин (пластическое разрушение);
- 2) растрескивание (хрупко-пластическое);
- 3) дробление (хрупкое).

Как уже отмечалось, характер разрушения породы зависит от величины и скорости приложения нагрузки, т. е. свойства горных пород являются функцией внешних условий.

Квапил исследовал главные факторы, от которых зависят физико-механические свойства пород:

- вид и величину нагрузки (напряжений);
- скорость изменения нагрузки или напряжения (временной фактор);
- энергию излучения.

Из всех перечисленных видов разрушения нас интересуют последние два, поскольку при выбросах происходит непластическое разрушение пород. Хрупкость горных пород является функцией всех перечисленных факторов.

Как только один из факторов изменяется в определенных пределах, материал перестает быть хрупким (например, стекло, хрупкое при комнатной температуре, при нагревании до определенной температуры теряет свою хрупкость). И, наоборот, нехрупкое вещество в нормальных условиях может стать хрупким при соответствующей комбинации этих факторов (например, карналлит при увеличении скорости нагружения).

Высшей формой проявления хрупкого разрушения является дробление материала, которое может быть достигнуто посредством высокой скорости нагружения и разгрузки или измене-

ния вида нагрузки или характера деформации (изменения напряженного состояния).

В обоих случаях порода может мгновенно разрушаться на мелкие части с относительно высоким содержанием мелких зерен. На рис. 30 показано влияние скорости нагружения на характер деформации и разрушения. С увеличением скорости приложения нагрузки увеличивается склонность к дроблению. Чем выше скорость нагружения, тем быстрее накопленная потенциальная энергия при достижении предела прочности (который вообще возрастает с увеличением скорости приложения нагрузки) превращается в работу. Это означает, что горная порода с определенными петрографическими свойствами при достаточно высокой скорости нагружения попадает в состояние, при котором способна мгновенно разрушиться.

Следует учесть, что не вся потенциальная энергия переходит в работу по разрушению в виде дробления, так как часть ее расходуется на сопутствующие (одновременно происходящие) явления, например на образование трещин или на деформацию упругого восстановления (обратную деформацию). При разрушении в форме дробления, как правило, наблюдается также менее интенсивный характер разрушения — в форме растрескивания. Это происходит из-за неоднородности породы. Такой вывод подтверждается тем, что критические условия нагружения были не во всех точках разрушенного объема породы.

Разрушение горных пород в виде дробления может быть вызвано не только повышением скорости приложения нагрузки (изменения напряжения), но и быстрым изменением напряженного состояния или комбинацией этих условий. В каждом случае результат разрушения может быть одинаковым: интенсивное разрушение породы с частичным измельчением ее в порошок.

Влияние изменения характера приложения нагрузки или деформации на возможность накопления энергии показано на рис. 31, на котором рассматривается схема ионокристалла, состоящего из двух положительных и двух отрицательных ионов. Заштрихованные участки показывают количество потенциальной энергии, которую может накопить порода в границах упругости. Если характер приложения нагрузки или напряженное состояние изменится, например, от символа I (всесторонняя равномерная нагрузка) к символу V (внезапная разгрузка в направлении на-

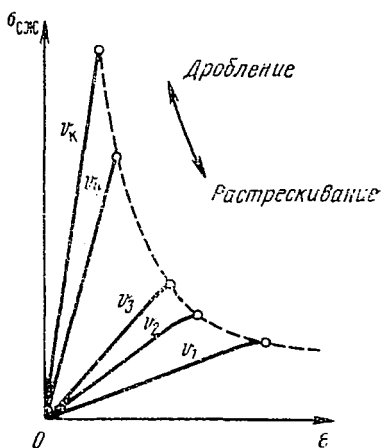


Рис. 30. Влияние скорости нагружения v на характер деформации и разрушения (по Квапилу) [36]:
 $v_1 < v_2 < \dots < v_k$

грузки), то возможность накопления потенциальной энергии напряжения станет значительно меньше (отрицательная деформация). Это означает, что при переходе от символа I к символу V

появляется избыток энергии. При этом изменении (отрицательной деформации) одновременно уменьшается прочность породы и освобождающаяся потенциальная энергия производит разрушение в виде дробления.

Пфорт применил теорию Квапила при исследовании удароопасности горных пород некоторых пластов калийных рудников ГДР [36]. При этом он учитывал характер разрушения пород при горных ударах, наблюдаемых на практике. Было установлено, что посредством растрескивания разрушаются такие породы, как силвинит, каменная соль, хартзалц, а посредством дробления — различные виды карналлита. Пользуясь терминологией Квапила, можно сказать, что и при внезапных выбросах горные породы разрушаются в основном посредством дробления. В этой связи исследование Пфорра представ-

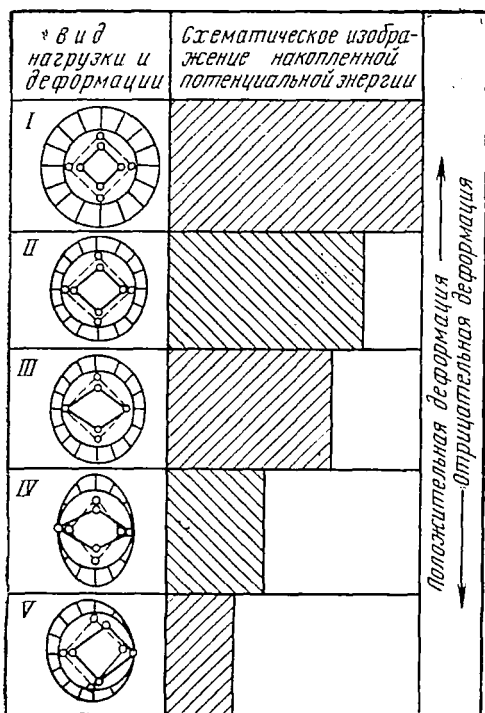


Рис. 31. Схематическое изображение характера деформации и способности накапливать потенциальную энергию в зависимости от характера нагружения (по Квапилу) [36]:
I—V — виды нагрузок

ляют интерес для выяснения причин, вызывающих разрушение карналлита в виде дробления.

Лабораторные условия для исследований были выбраны таким образом, чтобы разрушался карналлит [36]. На основании вышеизложенной теории Квапила были выбраны два вида испытаний.

1. Испытания крупнокускового карналлита и каменной соли при внезапном изменении характера нагружения, а именно при внезапном разгрузении предварительно всесторонней нагруженной пробы, что соответствует приблизительно переходу от символа I к символу V (см. рис. 31).

2. Испытания на сжатие при различных скоростях нагружения; единственный случай — испытание на удар свободно подающим грузом.

Влияние энергии излучения (например, повышение температуры) не исследовалось, так как температура, представляющая интерес для практики горного дела, находится в пределах 20—35° С. В данном случае работы проводились при температуре, соответствующей температуре карналлитового пласта Тюринген.

При первом виде испытаний были созданы условия, когда образец соляной породы помещался в стальной автоклав, причем создавалась всесторонняя равномерная нагрузка в 600 кгс/см² на стальную оболочку. Внезапное изменение характера нагружения достигалось устранением стальной стенки автоклава. При данных условиях было получено мгновенное разрушение карналлита в виде дробления, в то время как каменная соль, сильвинит и хартзальц не разрушались. Следовательно, при данных условиях избыток энергии, возникающий при внезапном изменении напряженного состояния, оказался достаточным для дробления карналлита и недостаточным не только для дробления, но даже для растрескивания других соляных пород.

Влияние скорости нагружения было исследовано в определенных пределах и для карналлита было показано ранее (см. рис. 5).

Установлено, что в исследованных пределах скорость нагружения оказывается достаточной для установления возможности разрушения посредством дробления песчаника, ангидрита и карналлита. Чем больше окорость нагружения, тем интенсивнее характер разрушения.

Испытания на удар были проведены с целью установления величины критической энергии падения, т. е. минимального количества энергии, при котором породы разрушались. Пробы пород были обработаны до цилиндрических пластинок диаметром 130 и 70 мм и толщиной 20 мм и запрессованы в стальные кольца. Средние значения критической энергии падения оказались равными: для карналлита 12, для хартзальца, сильвинита и каменной соли 40,9, для ангидрита 57,4, для песчаника 62,2 кгс·м.

Уменьшение величины критической энергии падения для указанных пород находится в такой же последовательности, как и их прочность на сжатие.

Исследованиями Пфorra было также установлено, что из всех соляных пород карналлит, имеющий относительно низкую прочность на сжатие, обладает самым большим приростом энергии при увеличении скорости нагружения и наибольшими абсолютными значениями освобождающейся энергии при разрушении.

Однако, как известно, выбросоопасной породой в калийных рудниках может быть не только карналлит, но и сильвинит и каменная соль. По-видимому, отличие свойств этих пород в выбросоопасных участках от обычных, приводящее к их мгновенному хрупкому разрушению, связано с повышенной газоносностью этих участков.

Таким образом, все вышесказанное дает основание считать,

что порода выбросоопасной зоны может быть разрушена при различных условиях: при превышении предела прочности на сжатие в момент взрыва, что согласуется с гипотезой Г. Д. Ефремова; при разгрузке за счет растягивающих (В. И. Николин и другие) или касательных напряжений (Н. Е. Волошин и другие). Практически, по-видимому, могут иметь место как те, так и другие условия.

Так, при отбойке горной массы взрыванием выбросоопасный участок попадает из условий всестороннего сжатия, характерного для нетронутого горными работами массива, в условия с высокой скоростью нагружения (в момент взрыва). При этом данный участок массива находится на значительном расстоянии от поверхности. Известно, что в момент взрыва происходит мгновенное перераспределение напряжений на вновь образованном контуре выработки. При этом величина ударно прилагаемой нагрузки, особенно в местах концентрации напряжений, может значительно превышать предел прочности породы на сжатие (в частности, замеры Г. Д. Ефремовым значения напряжений для песчаника [10]). В таких условиях, как известно из данных по разрушению некоторых пород в условиях всестороннего сжатия в камере Кармана, может также произойти хрупкое разрушение. Так, нами было установлено разрушение карналлита выбросоопасной зоны на глубине 1—2 м от поверхности забоя.

При очередном взрывании выбросоопасный участок породы подвергается внезапному изменению напряженного состояния и характера деформации, в результате того что одна его поверхность освобождается от подпора породы и получает возможность деформироваться в сторону выработанного пространства. Тогда за счет деформации упругого восстановления возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к разрушению породы в виде дробления. По-видимому, это характерно для пород, имеющих весьма небольшую прочность на разрыв (карналлит, некоторые угли). Большое количество мелких кусков при выбросах карналлита и угля свидетельствует о разрушении от отрыва.

Образование пластин характерной выпукло-вогнутой формы при выбросах песчаника свидетельствует о том, что разрушение может произойти и вследствие сдвига под действием максимальных касательных напряжений (Н. Е. Волошин и др.).

Характер разрушения карналлита при выбросах и трещиноватость стенок полостей выбросов свидетельствуют, на наш взгляд, о том, что разрушение происходит под воздействием различного вида напряжений: касательных, вызывающих сдвиг (послойные трещины с поверхностями скольжения), и нормальных, вызывающих разрыв (по радиальным и концентрическим трещинам), и дробление карналлита.

В конкретных случаях при выбросах не всегда могут действовать совершенно одинаковые комплексы причин. Этим, по-видимому, объясняется многообразие взглядов на механизм и природу

выбросов и отсутствие до сих пор единой и полностью разработанной теории. Главными причинами внезапных выбросов, по мнению большинства специалистов, являются горное давление, давление газа и некоторые свойства пород. Поэтому очевидно, что для предупреждения внезапных выбросов необходимо устранить или уменьшить факторы, их вызывающие. Поскольку устранить горное давление нельзя, нужно стремиться, чтобы его изменение было менее динамичным, более плавным. Можно, например, каким-либо образом уменьшать давление газа в пласте. И, наконец, можно изменять некоторые свойства пород, с тем чтобы при тех же внешних условиях порода выбросоопасного пласта становилась менее хрупкой, способной разрушаться пластически.

§ 4. Отличия внезапных выбросов солей от внезапных выбросов угля

В СССР разработаны эффективные мероприятия по предотвращению внезапных выбросов угля и газа или воздействию на них. Для того чтобы эти мероприятия можно было использовать для условий калийных рудников, рассмотрим более детально характеристику внезапных выбросов солей в сравнении с выбросами угля.

Наиболее полные и глубокие сведения о внезапных выбросах угля и газа даны в работе В. В. Ходота [24].

Внезапные выбросы на угольных пластах происходят обычно при глубине залегания пластов 250 м, хотя известны случаи выбросов и при меньшей глубине (приблизительно 100 м). Соликамский и Первый Березниковский рудники разрабатывают карналлит на глубине в среднем около 250 м.

С увеличением глубины разработки угля частота и интенсивность выбросов возрастают. При этом происходят выбросы породы и газа и при глубине более 1000 м выбросы только породы. Этот признак до конца 1968 г. для условий Верхнекамского месторождения не был проверен, так как разработка более глубоких участков еще не велась. Однако на месторождении есть участки, залегающие на глубине 400—500 м. Учитывая весьма низкую газопроницаемость соляных пород и, следовательно, невозможность миграции газов в сводовые части антиклинальных структур месторождения (см. главу I, § 1), можно считать, что газоносность соляных пород приблизительно везде одинакова. Поэтому было сделано предположение [18], что с увеличением глубины разработки частота и интенсивность газодинамических явлений на карналлитовом пласте возрастут и что эти явления могут проявиться и при разработке силвинита.

Выбросы угля и газа часто связаны с геологическими нарушениями, но бывают и при спокойном залегании пласта. На карналлитовых пластах эти явления приурочены в основном к микроантиклинальным перегибам шестого слоя пласта В, но часто происходят и при горизонтальном его залегании.

Частота и сила внезапных выбросов угля и газа возрастают с увеличением мощности пласта. На карналлитовых пластах опасность возникновения внезапных выбросов также увеличивается с увеличением мощности слоя B_6 .

Большинство внезапных выбросов направлено сверху вниз и лишь единичные случаи — снизу вверх, причем сила их значительно меньше силы первых. Разрушения и сдвигения карналлита происходят из кровли целиков и забоя и иногда из почвы. Часто одновременно разрушаются кровля, целик и немного почва.

На угольных шахтах СССР выбросы происходят с участием только метана, в бассейне Верра — с участием углекислого газа, в Южном Гарце — с участием одновременно метана и углекислого газа. Известны случаи внезапных выбросов с участием азота. На калийных рудниках Верхней Камы в состав внезапно выделяющихся газов кроме метана входит водород, причем содержание его превышает содержание метана на Соликамском руднике.

Количество выброшенного угля колеблется от нескольких тонн до нескольких тысяч тонн. На карналлитовых пластах размеры разрушенной горной массы изменяются примерно в этих же пределах.

Количество выделившегося газа на 1 т угля за один выброс колеблется от единиц до 1500 м³. Причем В. В. Ходот считает, что данные по газовыделению в большинстве случаев преувеличены, так как при подсчете учитывают газ, выделяющийся после внезапного выброса. При попытках определить количество газа за один выброс оказывалось, что оно не превышает возможную газоемкость угля, достигающую при давлениях газа 50 кгс/см² 45 м³/т для метана и свыше 100 м³/т для углекислого газа.

Количество газа, выделяющегося при внезапном выбросе карналлита, по-видимому, может быть весьма различным. Так, по данным Ф. Ф. Пермякова, относительное газовыделение, приходящееся на 1 м³ выброшенного карналлита, составляет в среднем около 1 м³; по нашим данным, в среднем 6,1 м³, максимальное 22,5, а по данным, приведенным в работе [28], в среднем 44,3 по Первому Березниковскому руднику и 26,1 м³ по Соликамскому.

Угли пластов, опасных по внезапным выбросам, отличаются пониженной прочностью, перемятостью, развитием трещин тектонического происхождения. Эти же признаки характерны и для опасных участков карналлитового пласта.

Разрушенный уголь из полости выброса внешне не отличается от обычного. Сверху он часто бывает покрыт тонким слоем пыли толщиной 20—30 см. В некоторых случаях выброшенный уголь бывает измельчен до состояния тонкой пыли. Масса карналлита бывает разрушена обычно на куски, много мелких комков, чешуек и пыли. Разрушенная масса находится всегда в куче, как бы высыпана, а не разбросана, как после взрывных работ.

Полости после выбросов угля и газа чаще всего имеют удлиненную форму с меньшими размерами горловины по сравнению

с диаметром самой полости; бывают пустоты и другой формы: конусообразной, прямоугольной, грушевидной, эллиптической, в виде неглубоких выемок на поверхности забоя и др.

Формы стенок полостей, образующихся после выбросов карналлита, также весьма разнообразны и имеют большое сходство с полостями в угле и еще большее — с полостями, образующимися после выбросов пород. Так, при небольших выбросах из стенок или кровли выработок формы стенок полостей в карналлите и в каменной соли (Индерское месторождение) очень похожи, имеют форму овального углубления с характерной системой трещин. В целом формы полостей в карналлите более сглаженные, чем в угле.

Большинство внезапных выбросов на угольных пластах связано с подвиганием забоя и воздействием процесса отбойки на пласт, причем вероятность внезапного выброса возрастает с увеличением сотрясения угля в массиве. Однако нередко так называемые запоздалые выбросы, происходящие не непосредственно после сотрясательного взрывания, а через промежутки времени от нескольких минут до нескольких часов. Такая же закономерность прослеживается и на карналлитовом пласте.

Наряду с одинаковыми признаками выбросоопасный карналлитовый пласт имеет некоторые отличия от угольного.

1. Выбросоопасный угольный пласт или прослойка относительно равномерно насыщен газом, тогда как карналлитовый пласт *B* имеет неравномерную газоносность не только по слоям, но и в максимально насыщенном газом шестом слое. Выбросоопасные участки пласта расположены гнездами и имеют наиболее высокую газоносность. Часто они приурочены к раздувам шестого слоя. Относительная газоносность карналлита во много раз меньше, чем угля.

2. Газ в угле находится в свободном и сорбированном состоянии, причем огромная часть его (около 90%) — в сорбированном. Газ в карналлите находится в свободном, сорбированном и микровключенном состоянии.

Первое и второе отличия выражаются в том, что отброс карналлита при внезапном выбросе за счет энергии сравнительно небольшого количества газа происходит на небольшие расстояния.

3. Угольный пласт является газопроницаемым. Поэтому одним из способов борьбы с внезапными выбросами является дренирование газа из пласта с помощью открытых скважин. Карналлит практически газонепроницаем.

4. Во внезапном выбросе карналлита кроме метана участвует водород, что увеличивает опасность взрыва и пределы взрываемости газо-воздушной смеси.

Все эти отличия не являются принципиальными, а лишь подчеркивают специфику внезапных выбросов карналлита. Вместе с тем их необходимо учитывать при разработке методов предупреждения выбросов.

Глава V

МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ВНЕЗАПНЫМИ ВЫБРОСАМИ СОЛИ И ГАЗА

§ 1. Опыт борьбы с выбросами на Верхнекамских рудниках

Верхнекамское месторождение — первое в СССР, где начали разрабатывать выбросоопасный пласт соли — карналлитовый пласт В. Со времени начала разработки карналлитового пласта на Верхнекамском месторождении неоднократно делались попытки борьбы с внезапными выбросами и с их отрицательными последствиями. Так, с целью создания более безопасных условий работы и уменьшения числа выбросов карналлита способ отбойки карналлита за первые 10 лет менялся шесть раз.

Первоначально отбойка карналлита производилась с применением огневого взрывания. С целью предотвращения воспламенения и взрывов смесей выделяющихся горючих газов с воздухом огневое взрывание в 1937 г. было заменено электрическим взрыванием с применением взрывобезопасной аппаратуры. Карналлит стали отбивать потолкоуступным забоем взрывным способом. При этом стали постоянно происходить выбросы со всеми вышеописанными отрицательными последствиями. Было сделано предположение, что причиной выбросов являются взрывные работы. В 1939 г. взрывные работы были отменены и выемка карналлита стала производиться отбойными молотками с созданием зарубной щели врубовой машиной. Общее число выбросов резко сократилось. По данным Ф. Ф. Пермякова, количество выброшенной породы в блоке при этом способе отбойки составило 3% общего количества добытой породы, тогда как при взрывных работах — 66% в том же блоке. Однако только при работе в блоке 7 было отмечено 4 выброса с количеством выброшенной породы от 4 т до 4 тыс. т.

При работе отбойными молотками происходили мгновенные обрушения карналлита, которые были очень опасны для людей, работающих в забое.

Одной из причин, вызывающих выбросы, стали считать давле-

ние газа в пласте. Для того чтобы уменьшить давление газа, начали применять дренажное бурение перед выемкой породы отбойными молотками. Исследования эффективности дренажного бурения шпуров и скважин различного диаметра и длины показали, что оно способствует выделению очень незначительного количества газа и что радиус влияния скважин мал. Применение дренажного бурения не дало положительных результатов из-за очень низкой газопроницаемости калийных солей. Так, после применения предварительного дренажного бурения в забое гезенка камеры 6 блока 11, где были пробурены 24 дренажные скважины и 10 шпуров по 1,5 м длиной, при взрывании кроме отбитой взрывом массы обрушилось около 350 т карналлита. При этом обрушение сопровождалось обильным газовыделением.

Начиная с 1942 г. отбойка карналлита в камерах производится буровзрывным способом почвоуступным забоем. При этом способе устраняется непосредственная опасность выброса для людей, работающих в забое, и несколько уменьшается интенсивность выбросов по сравнению с работой потолкоуступным забоем, но не ликвидируются вредные последствия, описанные ранее.

Исследованиями кафедры охраны труда и рудничной вентиляции ППИ, как отмечалось, было установлено, что параметры буровзрывных работ могут влиять на интенсивность выбросов. ПермНИУИ также проводил работы по установлению причин нарушений проектных размеров карналлитовых камер и целиков (нарушений, связанных с выбросами) [4]. Были выявлены следующие факторы, вызывающие нарушения: складчатость и газоносность пласта В, число шпуров и плотность заряда, слабый контроль за направлением камеры, нарушение паспорта буровзрывных работ (уменьшение расстояния между стенкой выработки и шпурами).

Образование нарушений в местах сопряжения складок пласта В—Г с целиком объяснялось различием в акустической жесткости карналлита и каменной соли, вследствие чего при взрывании образуются участки с различной напряженностью и происходят вывалы*. При определенных условиях (выемке отбойными молотками) разрушения, обрушения и вывалы карналлита могут произойти под воздействием газа, заполняющего под давлением волосяные трещины. При взрывании происходят колебания частиц массива и газа, интенсивность которых пропорциональна упругости среды и силе взрыва. Упругость карналлита и частиц газа различна, их колебания не совпадают и возникают удары газа о стенки выработки. При определенной величине плотности заряда удары газа могут вызвать обрушения карналлита. Установлено, что опасной плотностью заряда является величина приблизительно 1 кг/м^2 , что примерно соответствует числу шпуров в передовом уступе 15—20.

* Здесь употребляется терминология авторов [4], называющих данные явления вывалами и обрушениями.

Наблюдения ПермНИУИ показали, что ведение буровзрывных работ в соответствии с паспортом не исключает случаев выбросов, хотя и уменьшает их интенсивность. Изменение паспорта буровзрывных работ и опытная обработка камер 15 блока 45 с новыми параметрами не дали положительных результатов.

Таким образом, первоначальные попытки борьбы с внезапными выбросами карналлита и газа были неудачными. Проводимые мероприятия были направлены на устранение или уменьшение какой-либо одной причины или последствия выброса (уменьшение давления газа, уменьшение или исключение сейсмического действия взрыва и т. д.). Наиболее серьезные исследования в борьбе с внезапными выбросами горных пород и газов проведены в последнее десятилетие. Состояние данной проблемы в горной науке в настоящее время позволяет решить ее и для условий калийных рудников. Очевидно, что мероприятия по управлению выбросами могут быть успешными лишь в том случае, если будут учитываться совместно все основные причины выброса.

§ 2. Зарубежный опыт борьбы с выбросами

Наибольший интерес представляют работы, проведенные в ГДР, где в течение более 70 лет происходят выбросы на калийных рудниках и ведутся обширные исследования в этой области.

Для уменьшения вредных последствий выбросов и безопасности трудящихся калийных рудников в ГДР разработана система защиты, представляющая собой комплекс организационно-технических мероприятий [30, 31]. Основное содержание системы защиты показано на схеме, приведенной на рис. 32.

Из 10 защитных факторов (рис. 32) теоретически создается 36 комбинаций так называемых защитных ситуаций (рис. 33). Для практики имеют значение 18 случаев. Для каждой из 18 опасных ситуаций разработаны организационно-технические меры защиты. В качестве примера приводится защитная инструкция для ситуации № 9.

Ситуация № 9

Причина	Суфляр
Объект защиты	Люди
Зона защиты	1 (под землей — перед местом его проявления)
Время защиты	Рабочая смена
Задачи защиты	Людей, находящихся у места действия суфляра, предохранить от недостатка кислорода и травмирования.
Защитные мероприятия	<ol style="list-style-type: none"> 1) Запретить взрывные работы во время нахождения людей под землей. 2) Запретить бурильщикам стоять во время бурения шпуров за бурильной машиной (рабочее место — сбоку машины). 8) Использовать при разведочном бурении затворы для скважин, которые при попадании скважины в суфляр автоматически закрывают ее устье. 19) Держать наготове самоспасатели регенерирующего типа для выхода.

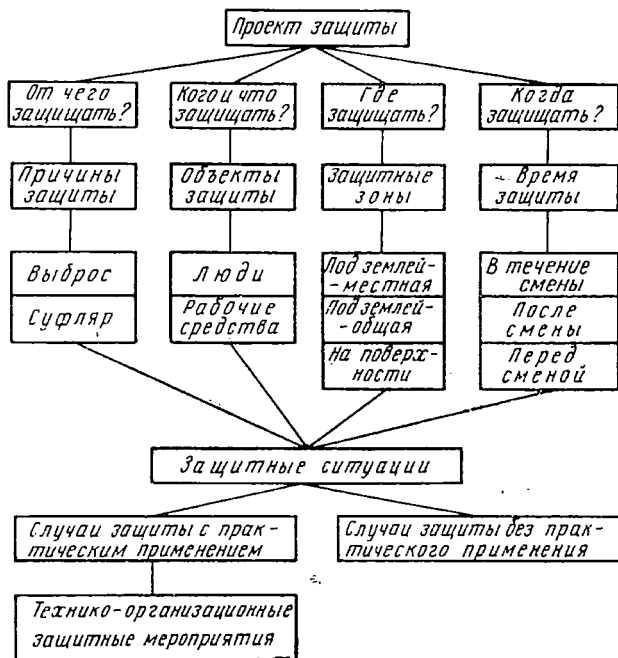


Рис. 32. Проект защиты от последствий выбросов [31]

№ п/п	Объекты защиты	Причина защиты	А			Б			С		
			І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ	І	ІІ	ІІІ
			Защитные ситуации								
1	Люди	Выброс	1	2	3	4	5	6	7	8	—
2		Суфляра	9	10	—	11	12	—	13	14	—
3	Рабочие средства	Выброс	15	16	—	17	18	—	—	—	—
4		Суфляра	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 33. Практически возможные опасные ситуации [31]:

Время защиты: А — в рабочую смену; Б — после смены; С — перед сменой;
 защитные зоны: І — под землей, у места проявления; ІІ — под землей —
 общая защитная зона; ІІІ — на поверхности; 1—18 — опасные ситуации

Применение на практике данной системы защиты показало, что если строго соблюдать разработанные мероприятия, можно избежать очень тяжелых последствий от выбросов породы и углекислого газа. Однако при выбросах не исключается опасность нарушения кровли очистного забоя, засыпка выработок пустой породой и их загазирование. Поэтому были разработаны дополнительные мероприятия по предотвращению отрицательных воздействий выбросов или распространению их. В целом законченная система защиты включает 42 организационно-технических мероприятия. В ней предусматривается проведение защитных профилактических мероприятий, а затем производится планомерный управляемый выброс.

Предварительные мероприятия включают в себя, в частности, выделение участков шахтного поля, опасных по скоплениям углекислого газа, методами локального прогноза. Локализация этих участков происходит в две стадии. На первой стадии выделяются крупные участки по данным геологической разведки. На второй стадии выясняют, какой газ содержится в данном участке — свободный или связанный. Скопления свободного газа в крупных трещинах или полостях являются причинами суфлярных выделений углекислого газа и не прогнозируются. Связанный газ (микropор и внутрикристаллический) является одной из причин выбросов, поэтому участки породы, пропитанные связанным газом, выбросоопасны. Выделение этих участков, т. е. прогнозирование выбросов может осуществляться тремя методами [40].

Защита всех технических средств производства в шахте осуществляется перед выбросом (перед взрыванием). После этого провоцируется местный выброс. Планомерный управляемый, искусственно вызываемый выброс позволяет не только избежать тяжелых последствий выброса и увеличения вследствие этого себестоимости полезного ископаемого, но и использовать энергию выброса для отбойки полезного ископаемого и снизить себестоимость его, поскольку соли, получаемые при выбросе, как правило, высокого качества.

Итак, для того чтобы осуществить планомерный, управляемый выброс, необходимо:

- 1) однозначное предсказание выброса, точное определение местоположения выбросоопасной зоны;
- 2) применение вышеописанной комплексной системы защиты, которая позволяет подготовиться к выбросу так, чтобы не было ущерба.

Участок шахтного поля, предназначенный для разработки, подразделяется на зоны, не содержащие CO_2 (вторичные зоны), и зоны насыщенные CO_2 (первичные зоны). При пересечении границ первичной зоны выработками определяют границы газоносных зон с помощью герметизатора (по давлению газа) или книстер-зонда. Граница опасной зоны устанавливается по точкам, в которых зафиксировано определенное давление газа в шпуре (повы-

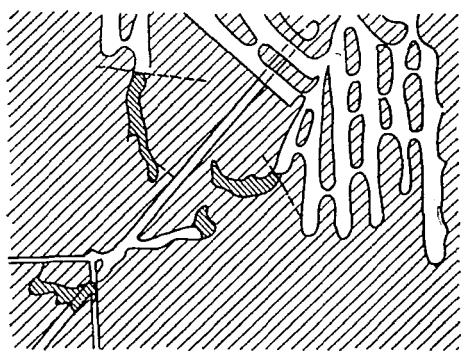
шенная газоносность). При ведении горных работ в пределах первичной зоны требуется увеличенная защита, например защитная прокладка кабеля или установка скреперной лебедки позади предохранительного целика. В пределах вторичной зоны необходим минимум защитных мероприятий.

В обычном случае на шахтах Верры применяется камерная система с возможно большей шириной камер. При достижении границ первичной зоны на тех участках, где предполагаются особенно тяжелые выбросы, ширину камер уменьшают для того, чтобы при образовании полости выброса можно было гарантировать достаточную устойчивость кровли. Полости искусственных выбросов при таком ведении работ представляют собой основное выработанное пространство. При этом образуются нерегулярно расположенные целики.

Первые опыты по провоцированию выбросов были проведены в январе 1962 г. на шахте «Менценграбен» [40]. Выбранный для опытов участок шахтного поля имел высокую склонность к выбросам и состоял из соли высокого качества.

Ситуация на участке перед провоцированием выбросов показана на рис. 34. По этому участку между карналлитом и сильвинитом проходила фацциальная граница, на которой при ведении горных работ неоднократно происходили выбросы соли и углекислого газа с опустошительными последствиями. Выработки в карналлите и каменной соли, пройденные ранее с помощью взрывных работ, показаны на рис. 34. Затем разработка этого участка была запрещена, поэтому горные работы в течение нескольких лет не проводились.

Схема фацциальных изменений состава пород, типичных для выбранного участка, показана на рис. 35. В обломочном карналлите выбросы или не происходили или происходили относительно слабые выбросы. В голубом сильвините, который нередко вклинивается в пласт карналлита, часто происходили сильные выбросы. В красном обломочном сильвините выбросы были менее частыми, но очень сильными. При выбросах сильвинита получали обычно высококачественную соль. Выбросы обломочной каменной соли были нежелательны из-за пустой соли выброса.



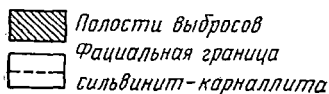


Рис. 34. Участок рудника «Менценграбен» перед первым провоцированием выбросов [31]

Первый выброс был спровоцирован 14 января 1962 г. Он дал 8600 т высококачественной соли, не принеся каких-либо разрушений. Даже лампы накаливания, находящиеся вблизи, продолжали гореть. Выделилось очень много газа. Далее, на том же участке до апреля 1963 г. было спровоцировано всего 11 выбросов соли и углекислоты. Положение полостей этих выбросов показано на

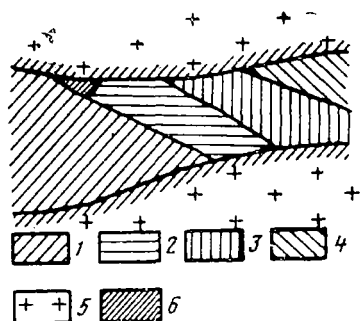


Рис. 35. Изменение состава породы пласта при приближении к выбросоопасным участкам (по Лютнеру) [30]:

1 — обломочный карналлит; 2 — глубокой сильвинит; 3 — красный обломочный сильвинит; 4 — обломочная каменная соль; 5 — нижняя и средняя каменная соль Верры; 6 — грубозернистая порода переходного состава с остатками карналлита

рис. 36. Количество полученной при выбросе соли при этом изменялось от 200 до 18 888 т при содержании K_2O от 11 до 16%. Среднее количество выброшенной породы составило около 3700 т. Из всех 12 выбросов 5 следует отнести к категории особо опасных, которые при внезапном проявлении могли бы привести к вредным последствиям.

На принципиальной схеме подготовки к управляемому выбросу (рис. 37) показаны защитные средства при применении узких камер для провоцирования выбросов. Скреперная лебедка, служащая для доставки соли по очистной камере, располагается в защитной камере, которая примыкает к штреку, где находятся кабели и другое электрооборудование. Щели в целиках для тросов скрепера можно плотно закрывать откидными заслонками.

Сравнение управляемого и внезапного выбросов можно провести на примере описания двух крупных выбросов, происшедших в шахте «Менценграбен».

15 октября 1957 г. после подъема людей из шахты произвели, как обычно, взрывание, в результате которого произошел внезапный выброс соли и углекислого газа. Газ заполнил большую часть участка и два шахтных ствола глубиной по 520 м. Население, живущее вблизи шахты, по тревоге было выведено в безопасное место. Углекислый газ отсасывался из шахты главным вентилятором, включенным на максимальную мощность в течение всей ночи. Подъемное отделение ствола шахты, из которого произошел выброс CO_2 , из-за больших разрушений не могло эксплуатироваться в течение 19 сут. Несмотря на большое количество полученных при выбросе солей относительно высокого качества, экономический ущерб не был возмещен.

Другой результат показал управляемый выброс от 23 апреля 1963 г. Во время утренней смены сменный мастер при обычных исследованиях буровой муки с помощью книстерзонда установил повышенную опасность выброса. После подъема людей из шахты

население, живущее вблизи, было предупреждено о предстоящем выбросе, надшахтная площадка очищена, горноспасательная служба приведена в боевую готовность, главный вентилятор включен на полную мощность.

При последовавшем взрывании разразился самый тяжелый в истории калийного бассейна Верра выброс соли и углекислого га-

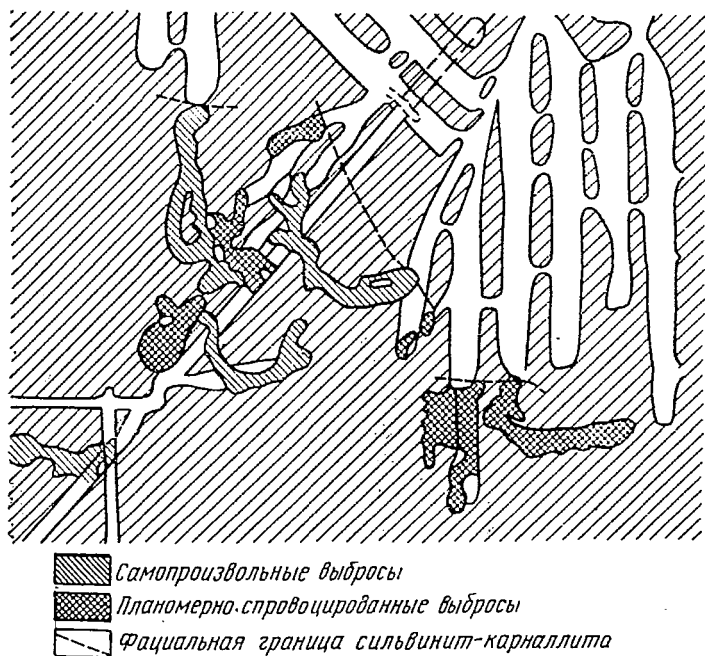


Рис. 36. Полости планомерно спровоцированных выбросов на участке рудника «Менценграбен» [30]

за. Было выброшено 18 тыс. т высококачественной соли. По обоим шахтным стволам выделилось большое количество углекислого газа, заполнившего большие участки поверхности. Под землей сработали не только автоматические газовые заслонки участка, но и заслонки соседних участков с изолированной вентиляционной струей.

Разрушений из-за выброса не произошло, за исключением незначительных повреждений некоторых вентиляционных сооружений и деформирования откидной заслонки перед защитной камерой скреперной лебедки. Небольшие разрушения были устранены за одну смену. Через 2 ч после выброса дневная смена уже смогла спуститься в шахту. Простой в работе транспорта был незначительным. Сравнение обстоятельств и последствий двух описанных выбросов приведено ниже.

	Внезапный выброс	Управляемый выброс
Количество выброшенной соли	Около 15 тыс. т	Около 18 тыс. т
Продолжительность выделения CO ₂ на поверхность	Около 20 мин	Около 20 мин
Сработавшие газовые заслонки	В этом участке	В этом и соседнем участках
Возможность ведения выемки после выброса	Через 7 ч	Через 2 ч

	Нет	Да
Предсказание выброса	Нет	Почти полностью
Принятые меры защиты	Не полностью	Постоянный экономический эффект
Характерные особенности	Местные повреждения рабочих средств	Почти нет
Зона разрушения	Обширная	Почти нет
Зона обрушений	Обширная	Незначительные
Нарушения производственного процесса	Простон участка в течение 19 дней	

Влияние на среднесуточную добычу	Весьма отрицательное	Весьма положительное
Влияние на среднюю производительность труда	Весьма отрицательное	Весьма положительное
Влияние на среднюю себестоимость добычи соли	Весьма отрицательное	Весьма положительное
Влияние на среднее качество добываемой соли	Весьма положительное	Весьма положительное

Т а б л и ц а 15

Виды расходов	Расходы			
	Внезапный выброс		Управляемый выброс	
	эконо- мия	пере- расход	эконо- мия	пере- расход
На подготовку выброса	—	—	—	2
На установку заслонов в шахте	—	1	—	1
На материал-заменитель	—	40	—	—
На ремонтные работы	—	25	—	1
На уборку породы	—	12	—	1
Нарушение производственного процесса	—	101	—	3
Реализация солей выброса	70	—	86	—
Общий баланс расходов . . .	70	179	86	8
Итого . . .	—	109	78	—

Распределение расходов при внезапном и управляемом выбросах в немецких марках приведено в табл. 15.

При внезапном выбросе 1957 г. производственные расходы увеличились на 109 тыс. немецких марок (на 44 тыс. руб.), в то время как при управляемом выбросе 1963 г. они уменьшились на 78 тыс. немецких марок (на 32 тыс. руб.).

При укрупненном расчете калькуляции экономичности управляемого выброса исходили из следующих факторов:

практически отсутствуют затраты на добычу соли при выбросе;

значительно снижаются затраты на единицу конечной продукции по добыче и транспортированию вследствие более высокого содержания K_2O в соли по сравнению с солью, полученной обычным способом;

достигается значительная экономия средств за счет повышения производительности скреперования, лучшего заполнения вагонов, увеличения объемов добычи благодаря более высокому содержанию K_2O , уменьшения отходов при обогащении и т. д.;

появляются незначительные дополнительные расходы в связи с проведением местных защитных мероприятий, необходимостью установления перемычек, а также с удалением выделившегося при выбросе газа из рудника.

Для экономичности искусственно вызываемого выброса большое значение имеет содержание K_2O в соли. При содержании K_2O в солях, равном 26%, себестоимость по сравнению с обычной снизилась на 65%, а при содержании K_2O , равном 11%, — на 3,5%. Граница экономичности выброса рудника «Менценграбен» находится при содержании K_2O в соли 10,6%.

Опыт планомерного провоцирования выбросов на руднике «Менценграбен» при определенных условиях может быть использован и другими калийными рудниками.

Выполнение системы защиты позволило управлять выбросами

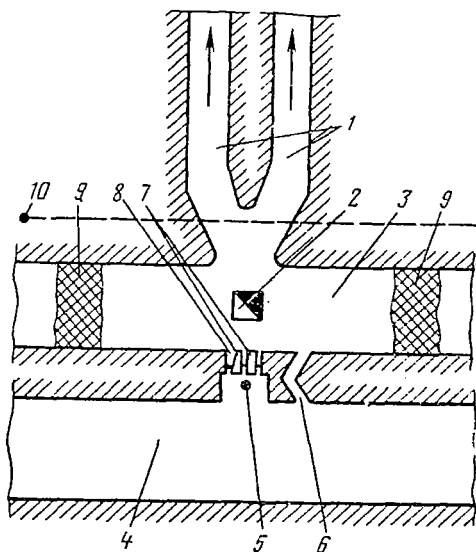


Рис. 37. Принципиальная схема подготовки к планомерному выбросу [31]:

1 — узкие камеры на участке, насыщенном углекислым газом; 2 — рудоспуск для выпуска масс выброса; 3 — сборный штрек; 4 — материальный штрек; 5 — камера для скреперной лебедки; 6 — ходок; 7 — отверстия для канатов лебедки; 8 — смотровое окно; 9 — защитные перемычки; 10 — граница первичной зоны выброса

в бассейне Верра в широких масштабах. Вредные последствия выбросов теперь наблюдаются редко. Почти полностью отпала необходимость в ремонтно-восстановительных работах после выбросов.

В последние годы в ГДР в связи с переходом на выемку камерами с короткими междукамерными целиками получены новые результаты в решении проблемы борьбы с выбросами [31].

Управление выбросом при буровзрывном способе отбойки основано на зависимости между размерами начального отверстия полости выброса, мощностью выбросоопасного пласта и размером выброса (рис. 38). Допустимые размеры выброса зависят от конк-

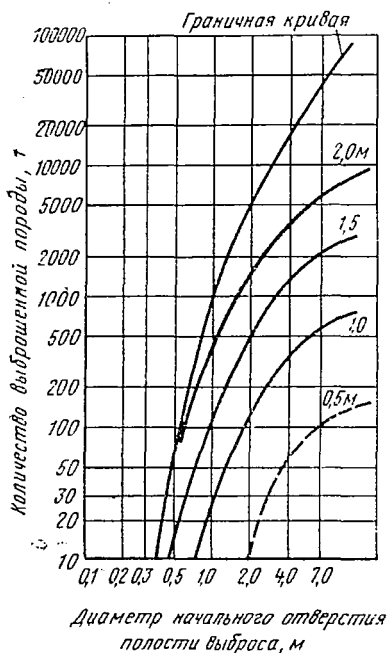


Рис. 38. Размеры выброса в зависимости от диаметра начального отверстия полости выброса и средней мощности пласта (по Маргграфу) [41]

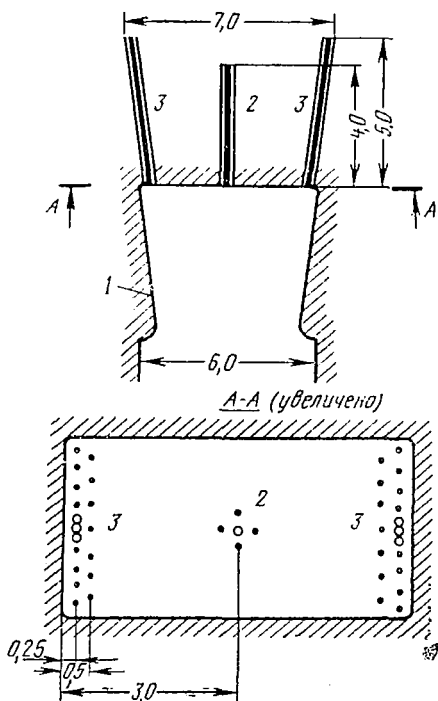


Рис. 39. Схема бурения при ограничении размера выброса в капитальных выработках [41]:

1 — контур проводимой выработки; 2 — расположение скважины, буримых для создания искусственного начального отверстия полости выброса; 3 — расположение скважин, буримых для образования щелей

ретных производственных условий, в частности от размеров и состояния выработок. Гиммом и его коллегами горные выработки были разделены на три группы.

I группа — капитальные и другие выработки, при проведении которых необходимо обеспечить их определенную форму и проект-

ные размеры и устойчивость кровли. При этом полости выбросов не должны выходить за проектные контуры выработки. Ограничение размера выброса достигается с помощью специального паспорта буровзрывных работ (рис. 39). Начальное отверстие полости выброса образуется искусственно путем создания прямого вруба в центре и двух боковых щелей бурением скважин большого диаметра. При взрывании по такой схеме провоцируются относительно небольшие выбросы (от 40 до 120 т в зависимости от мощности пласта). Остающиеся в контуре штрека целки вынимаются при втором взрывании, причем выброс уже не происходит.

II группа — забон камер, расположенные вблизи выемочного штрека или ценного оборудования. Цель ограничения размера выброса в этих случаях — не допустить засыпку оборудования или участкового штрека выброшенной породой, а также обеспечить соблюдение проектных размеров междукамерных целков. Выемка ведется с опережающим забоем меньшей ширины, а в передовом забое создается прямой вруб с незаряжаемыми врубовыми скважинами (рис. 40). При мощности пласта 1,1 м и ширине передового забоя 4,2 м количество выброшенной породы не превышает 500 т.

III группа — забои камер, расположенные на расстоянии более чем 50 м от выемочного штрека. Задачи по ограничению размера выбросов в этих случаях заключаются в следующем: не допустить загазирования атмосферы горного участка, разрушения оборудования, вывала каменной соли из кровли и чрезмерного нарушения ширины пролета камеры. Бурение производится по схеме, приведенной на рис. 40. Ширина передового забоя ограничивается, с тем чтобы выброс не превысил 3000 т при мощности пласта 1,1—1,8 м.

Такая технология управления выбросами не представляет

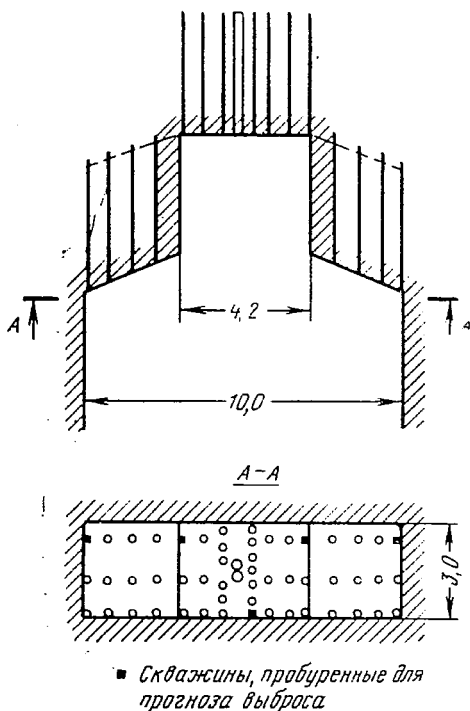


Рис. 40. Схема бурения для прогноза и ограничения размера выброса при выемке породы камерами с короткими целками [41]

трудностей в связи с созданием в ГДР передвижных буровых станков и безрельсового выемочного оборудования.

§ 3. Прогнозирование внезапных выбросов

Прогнозирование выброса имеет большое значение во всех случаях. Без применения каких-либо способов воздействия непосредственно на выбросоопасный участок массива (предупреждения, управления или провоцирования выброса) своевременный прогноз существенно повышает безопасность работ, позволяет вовремя осуществлять организационно-технические мероприятия, направленные на обеспечение безопасности и уменьшение возможного ущерба от внезапного выброса. При применении какого-либо метода воздействия на выбросоопасный участок прогноз позволяет выделить этот участок и способствует более эффективному использованию метода прогноза, а при отсутствии опасности выброса позволяет избежать непронзводительных затрат труда и средств. Поэтому наряду с поисками способов управления выбросами велись исследования по созданию методов их прогноза.

Первые попытки прогнозирования выбросов основывались на визуальных наблюдениях и связывались с особенностями геологического строения опасных участков. Так, Ю. В. Морачевский и М. П. Фивег предложили считать основным фактором прогноза тектонический признак, вспомогательными — характер газоносности и петрографические особенности пород. Такой метод прогноза весьма неточен, так как позволяет оценить строение породы только на поверхность забоя, а не на глубине. Часто этих признаков оказывается недостаточно для предсказания выброса. По указанным признакам в большинстве случаев нельзя оконтурить опасный участок и предсказать силу и размер выброса. Прогнозировать выброс с наибольшей вероятностью могут только специалисты, имеющие большой опыт работы в условиях данного выбросоопасного пласта.

Дальнейшие попытки прогнозирования были основаны на предположении о различии физических свойств пород невыбросоопасных и выбросоопасных участков, связанных с их неодинаковой пористостью и газоносностью. Из известных геофизических методов для выделения газонасыщенных (выбросоопасных) зон были выбраны сейсмические и электрические методы.

Так, Атласом-Верке были проведены испытания ультразвукового метода. При этих испытаниях исходили из предположения, что скорость звука в газонасыщенных породах существенно отличается от скорости звука в породах, не содержащих газа. Считалось, что ультразвуковой импульс, посылаемый в породу, отразится на границе газонасыщенной зоны. Частота ультразвука составляла 22 кГц, что для соляных пород соответствует длине волны от 20 до 30 см. Недостатки метода — его высокая чувствительность (от-

ражать ультразвуковой импульс оказались способными даже небольшие неоднородности, тончайшие трещины и границы пластов) и проблема связи осциллятора с породой — не позволили применять его в качестве надежного способа обнаружения газонасыщенных зон.

В 1968 г. В. Ф. Коротаевым (ППИ) с целью прогнозирования газонасыщенных зон был испытан ультразвуковой метод на Соликамском руднике.

Был использован метод продольного профилирования: излучатель ультразвуковых волн располагался на одной прямой с приемником, который перемещался по этой прямой на определенном расстоянии. Такой метод позволяет фиксировать изменение скоростей распространения упругих волн по всей длине и выявить участки, отличающиеся своими свойствами (влияющими на скорость прохождения волны).

С поверхности забоя камеры карналлитового пласта снимали площадку рыхлого слоя с помощью отбойного молотка. Размеры площадки составляли около $1,5 \cdot 0,5$ м². Прибор УКБ-1 устанавливали непосредственно у места замера. Для улучшения контактов излучатель-массив и массив-приемник на преобразователи наносили слой вазелина. После настройки аппаратуры излучатели прижимали к начальной точке линии измерения, а приемник перемещали по ней (рис. 41). Через определенные расстояния замеряли время прохождения ультразвуковых волн через массив по первому приходу волны. Было проведено прозвучивание 63 линий. Четко выделить газонасыщенные зоны не удалось, так как скорость ультразвука (2910 м/с) в них ненамного отличалась от скорости в малогазонасыщенной породе (2995 м/с).

Возможность применения электрического метода основывалась на следующих положениях. Соляная порода, которую практически можно рассматривать как изолятор, имеет сопротивление $\rho = 10^6 \div 10^8$ Ом·см и диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 4 \div 8$. Если соль пропитана газами, то можно считать, что она имеет включения неизвестной проводимости (в частности, диэлектрическая проницаемость углекислого газа $\epsilon = 1$). Таким образом, проводимость и диэлектрическая проницаемость на участках со-

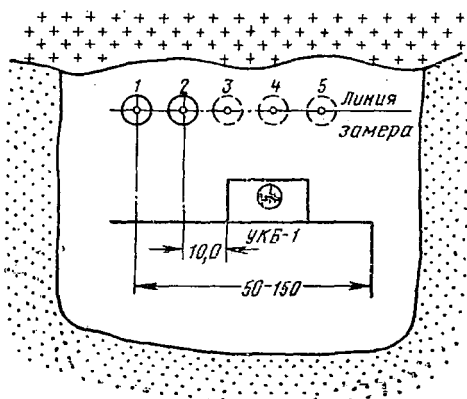


Рис. 41. Схема ультразвуковых измерений в карналлитовой камере:

1 — излучатель; 2—5 — положения приемника при измерениях

ляного газоносного массива должны отличаться от проводимости и диэлектрической проницаемости на негазонных участках.

Первые попытки определить наличие газа в солях электрическим методом были сделаны Ф. Фричем [40]. При исследовании он основывался на предположении, что диэлектрическая проницаемость сильнопористых солей, содержащих углекислый газ, $\epsilon=1$, отличается от диэлектрической проницаемости обычных солей с $\epsilon=4\div 8$ в том случае, если поры занимают большее пространство, чем скелет породы.

Для измерения был использован метод емкости. Принцип этого метода заключается в том, что исследуемая порода соединяется с колебательным контуром, параллельно которому подключается соответствующая емкость. При отключении породы изменяется собственная частота цепи (контра). Величина, на которую должен быть отрегулирован конденсатор, чтобы снова получить резонанс, — есть измеряемая величина (обозначается как эквивалентная емкость C'). Частота измерения составила 300 кГц. Включение породы в колебательный контур происходило через два плоских электрода. При всех измерениях поддерживались постоянные условия испытания.

Испытания проводились на карналлитовом пласте одного из калийных рудников ГДР. В конкретном случае удалось определить участок пористой (газоносной) соли. Однако такие результаты оказались случайными.

Обширные испытания по возможности применения электрометрии для определения участков солей, насыщенных углекислым газом, были проведены Рихтером. Он проводил измерения диэлектрической проницаемости породы через буровые скважины по методу резонанса при частоте 3 мГц. В противоположность Ф. Фричу, Рихтер полагал, что наличие CO_2 в соли должно повысить ее диэлектрическую проницаемость по сравнению с солью, не содержащей газа, так как внутрикристаллический углекислый газ содержится в смеси с рассолами. При этом он считал, что содержание CO_2 пропорционально содержанию рассолов, от которых в конечном счете зависит диэлектрическая проницаемость соляной породы.

Измерения емкости соли производились с помощью конденсатора, сконструированного в виде зонда для буровых скважин. Измерения дали положительный результат, но относились только к частным случаям и поэтому метод емкости не может быть применен для всех условий.

Ошибка рассмотренных методов заключается в однозначности принятых предпосылок. Более поздними исследованиями Ольснера было показано, что взаимосвязь между содержанием газов и рассолов в кристаллах солей отсутствует; кроме того, на диэлектрическую проницаемость солей оказывает влияние и наличие межкристаллического газа и другие факторы. Таким образом, выделить рассмотренными методами газонасыщенные зоны не удалось.

Однако учитывая, что при проведении указанных измерений Ф. Фричем и Рихтером не были параллельно проведены определения содержания газа в солях химическим методом (в то время еще не был разработан достаточно надежный способ определения содержания газа в солях) и все исследования строились только на предположениях, позднее такие исследования были повторены и результаты их были сравнены со значениями измерений содержания газа. Результаты указывали на то, что между значениями диэлектрической проницаемости и газоносностью (выбросоопасностью пород) не существует определенной связи. Поэтому рассмотренные электрические методы оказались непригодными для прогноза выбросов породы и газа.

Однако в настоящее время известно большое число экспериментальных данных, показывающих, что существует зависимость между электрическими параметрами горных пород и их напряженным состоянием.

В. Г. Артемовым (ППИ) в 1970 г. были проведены исследования по возможности применения электрометрии для оценки напряженного состояния соляных пород (для условий Индерского рудника). При испытании образцов каменной соли и карналлита были получены результаты, показавшие, что существует зависимость электрических параметров, в частности электрического сопротивления, от напряженно-деформированного состояния породы (рис. 42). Аналогичные результаты были получены и в натуральных условиях.

Таким образом, возможность применения электрического метода для прогноза выбросоопасности соляных пород не исключена. Этот вопрос требует дальнейших глубоких исследований.

Для оценки газоносности соляной породы в ГДР был разработан метод механического дробления [37]. Метод основан на положении, согласно которому связанные газы можно выделить не только путем растворения, но и путем дробления породы. Если дробление произвести в закрытом сосуде, то увеличение объема специальной газовой камеры может служить мерой объема освободившегося из породы газа.

Для размола образцов соли используется вибрационная лабо-

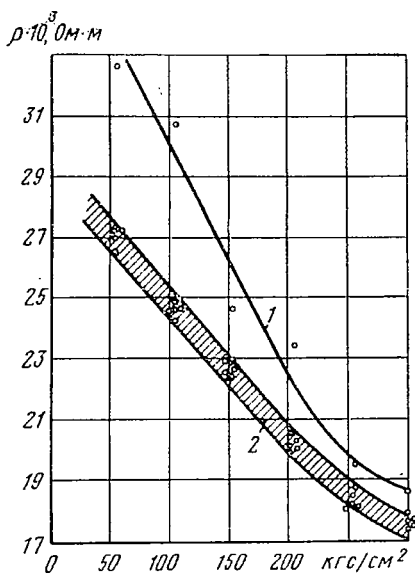


Рис. 42. Зависимость электрического сопротивления образцов каменной соли от нагрузки при напряженности электрического поля:

1—10 В/м; 2—30—1480 В/м

раторная мельница. При размоле появляется ряд факторов, влияющих на результат измерения, которые можно разделить на две группы.

К первой группе относятся факторы, влияющие на увеличение объема. Это дегазация соли, повышение температуры при размоле и связанное с ним увеличение давления водяного пара.

Ко второй группе относятся факторы, влияющие на уменьшение объема. К ним относится адсорбция газов тонкоизмельченным веществом, неполное дробление (часть газа остается невыделенной).

Учет эти факторы по отдельности теоретически очень трудно. Поэтому эмпирически была отработана методика, при которой погрешности «плюс» и «минус» взаимно уничтожаются. Однако практическое использование этого метода встретило значительные трудности, а точность измерений не удовлетворяла требованиям. Поэтому сейчас данный метод на практике не применяется.

В ГДР для решения научных и технических проблем, связанных с газами и газопроявлениями на калийных рудниках, было создано научно-техническое общество «Mineralgebundene Gase». Это общество внесло большой вклад в дело борьбы с опасностями выбросов и их прогнозированием.

Прогноз выбросов осуществляется в две стадии: первичный — региональный прогноз и вторичный — локальный. Региональный прогноз служит для подразделения шахтного поля на неопасные и потенциально опасные участки; локальный — для прогноза отдельных выбросов.

Региональный прогноз основан на точном знании геологических условий проявления выбросов. Так, для калийного бассейна Верра установлено, что преобразованные сильногазоносные соли, образовавшиеся под воздействием газонасыщенных напорных вод на первичные соли, являются потенциально выбросоопасными. Проведение регионального прогноза позволяет осуществлять локальный прогноз повсеместно.

Локальный прогноз основан на учете факторов выброса (напряженного состояния, физико-механических свойств и газоносности участка массива). Проведению инструментального и локального прогнозов должно предшествовать выделение опасных участков также по геологическим признакам в забое. Для бассейна Верра к таким геологическим признакам относятся: изменение состава пласта от первичного карналлита к преобразованному сильвиниту, изменение структуры и текстуры соляных пород, появление трещиноватости и изгибов пласта, повышенная газоносность (наличие полостей, слонности пород, суфляров).

На рудниках ГДР применяются три инструментальных метода прогноза выбросов.

Фрайбергский керновый метод прогноза. Сущность его заключается в оценке выбросоопасности по виду керна, полученного при бурении скважины в данном участке массива. Если керн сплош-

ной или отдельные его куски представляют собой цилиндры достаточной длины (превышающей его диаметр), то данный участок считается не опасным по выбросу. Если керн разделен на куски незначительной длины (меньше диаметра) или диски, то данный участок массива опасен по выбросу.

В СССР керновый метод применяется довольно широко для прогноза выбросов пород в угольных шахтах (впервые в нашей стране образование дисков в выбросоопасных песчаниках было отмечено П. Я. Галушко и М. А. Халимовским в 1962 г.).

По данным Л. Оберта и Д. Стефенсона, подобное разрушение керна (на диски выпукло-вогнутой формы) может произойти только в том случае, если радиальные напряжения (перпендикулярные оси образца) больше половины предела прочности на одноосное сжатие и выше напряжений по оси образца.

Исследования советских ученых показали, что для прогноза выброса с помощью кернового метода необходимо пробуривать выбросоопасную зону в различных направлениях. На дискообразование влияет не только напряженное состояние породы, но и ее физико-механические свойства.

Испытания кернового метода на Соликамском руднике показали, что в выбросоопасных зонах керналлитового пласта керн не образуется в виде выпукло-вогнутых пластин, а рассыпается на мелкие куски. Керн, выбуренный в силвинитовых пластах Второго Березниковского рудника, а также в их кровле и почве, представленных каменной солью с прослоями глины, разделяется в обычной невыбросоопасной породе на части по глинистым прослоям. По-видимому, для получения более достоверных данных о возможности применения кернового метода на Втором Березниковском руднике необходимы совершенные буровые станки, не создающие вибрации керноотборника.

Акустический метод определения газоносности основан на том, что выбросоопасные зоны имеют более высокую газоносность по сравнению с невыбросоопасными. При растворении газосодержащих солей в воде происходит освобождение пузырьков микровключенного газа, сопровождающееся треском. Чем более газоносна соль, тем выше уровень шума (количество тресков) при растворении. По этому принципу был разработан акустический метод измерения газоносности. Для относительной оценки газоносности породы оказывается достаточным содержание газа в буровом штыбе.

Трески, появляющиеся при растворении соли в воде, улавливаются микрофоном и преобразуются в переменное напряжение. Затем они усиливаются и попадают в измерительный прибор. Прибор действует таким образом, что его показание остается неизменным до тех пор, пока не появится следующий импульс. Показания суммируются. Считывание показаний прибора происходит после растворения определенной пробы соли. На рис. 43 показана принципиальная схема акустического газоизмерительного прибора.

Содержание газа в буровом штыбе, а следовательно, и показания акустического прибора зависят от крупности частиц соли (рис. 44). Установлено, что размеры частиц не должны быть меньше 3 мм.

Пробы отбираются при бурении шпуров или скважин. С помощью сит с соответствующими размерами отверстий производится отсев мелких зерен и от класса крупностью более 3 мм отбирается навеска в 5 или 10 г. Естественно, что чем больше испытывается проб, тем надежнее результат. Установлено, что показания акустического прибора с достаточной для практики точностью согласуются с данными химического анализа содержания газа. Значение напряжения, полученное в

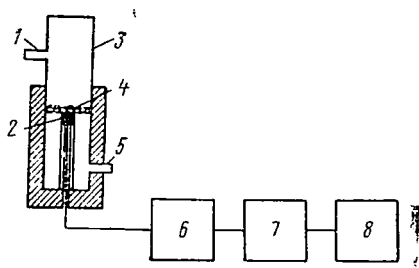


рис. 43. Принципиальная схема акустического газонизмерительного прибора:

1 — слив; 2 — микрофон; 3 — сосуд для раствора; 4 — газосодержащая соль; 5 — приток; 6 — усилитель; 7 — резистивно-емкостное звено и выпрямитель; 8 — вольтметр [40]

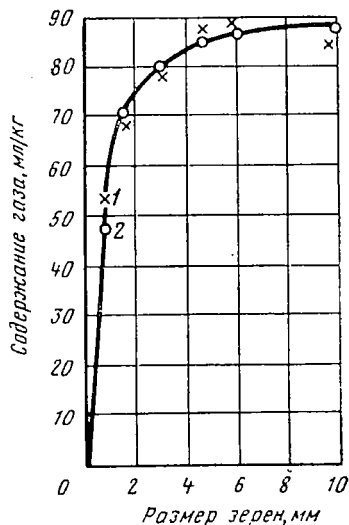


рис. 44. Содержание газа в буровом штыбе в зависимости от крупности зерен [40]:

1 — акустически измеренные значения; 2 — химически измеренные значения

результате растворения пробы с помощью тарировочной кривой в принципе может быть переведено в соответствующее содержание газа, хотя относительную оценку можно производить и по величине напряжения.

Измерения одной пробы занимают 2—5 мин, таким образом, за короткий промежуток времени (например, за время обуривания забоя) можно исследовать большое число проб и до производства взрывных работ получить сведения о возможном выбросе.

На рис. 45, а, б показаны результаты измерений книстерзондом содержания газа в двух забоях рудника «Менценграбен» при пересечении скважинами выбросоопасных зон в горизонтальном направлении. Скачкообразное увеличение содержания газа характеризует выбросоопасную зону, содержащую повышенное количество связанных газов (заштрихованные участки на рис. 45). На

небольших участках перед выбросоопасными зонами отмечается уменьшение содержания газа (зона, бедная газами, расположена между трещиноватой зоной, богатой свободными газами и зоной, опасной по выбросу).

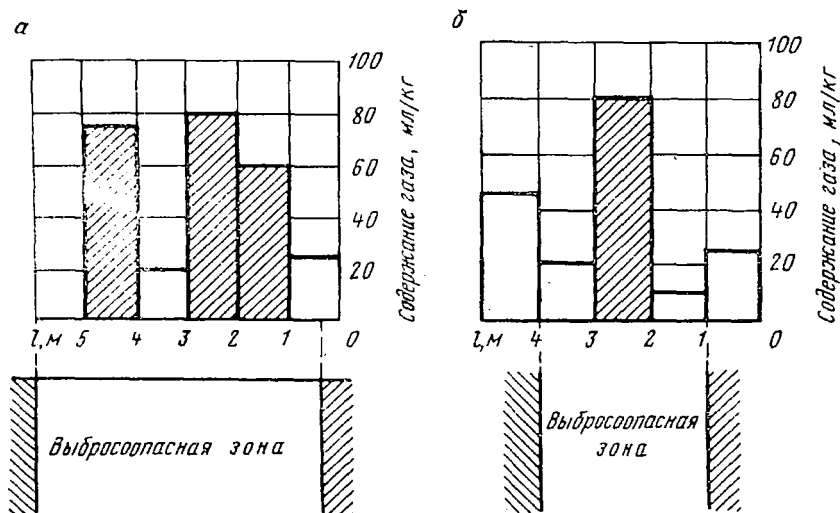


Рис. 45. Изменение содержания газа, замеренного в забоях рудника «Менценграбен» акустическим методом [40]:
а — первый забой; б — второй забой

На рис. 46 показано изменение содержания газа в породе в горизонтальном направлении, замеренное при бурении разведоч-

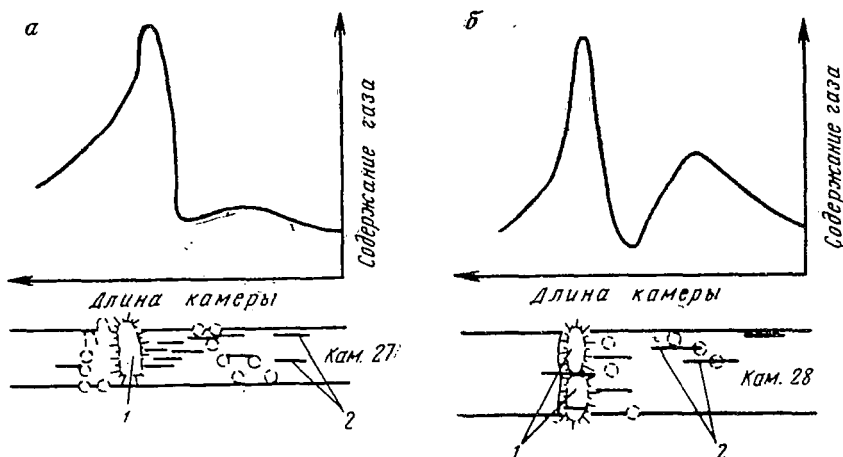


Рис. 46. Изменение содержания газа на участках, где произошли выбросы соли и углекислого газа [40]:
а — первый участок; б — второй участок; 1 — выброс; 2 — скважины

ных скважин. В месте, соответствующем максимальному содержанию газа, при взрывании произошел выброс соли и газа.

В трех случаях, показанных на рис. 46, имели место сравнительно небольшие выбросы (200 т и меньше). Максимальное содержание газа в керне разведочных скважин при первом выбросе составило 83, при втором — 84 и при третьем — 82 мл/кг. После выброса были отобраны образцы из пород, примыкающих к полости выброса. Среднее содержание газа в них оказалось равным 20—30 мл/кг.

Позднее были проведены массовые исследования по применению акустического метода. С помощью разведочных скважин длиной 4—8 м удалось определить расположение выбросоопасных зон, а в некоторых случаях и оконтурить их (рис. 47).

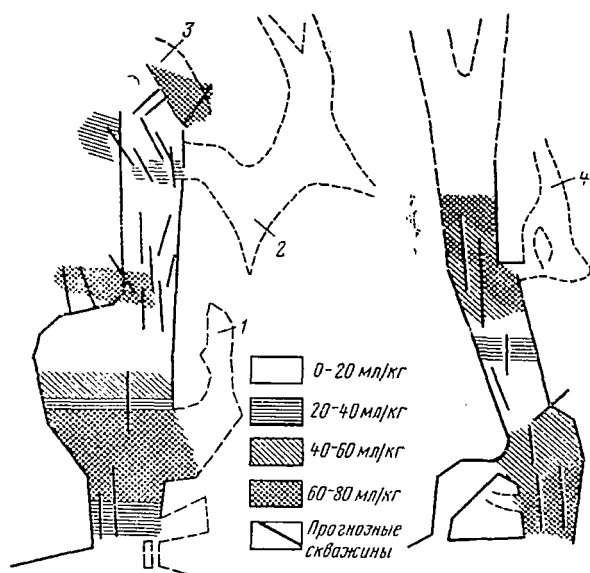


Рис. 47. Оконтуривание выбросоопасных зон разведочными скважинами:

1-4 — контуры полостей выбросов

Дальнейшие исследования по возможности прогнозирования выбросов с помощью акустического метода были проведены обществом «Mineralgebundene Gase» под руководством Гимма в 1961 г. на руднике «Маркс — Энгельс». Цель исследований заключалась в установлении возможности применения этого метода в горно-геологических условиях, отличающихся от рудника «Менценграбен». На руднике «Маркс — Энгельс» частые выбросы происходили из спутника разрабатываемого пласта Хессен, залегающего в кровле и отделенного от него слоем каменной соли мощностью 3 м.

Разведка зон, опасных по выбросу, производилась бурением вертикальных буровых скважин. Исследование породы пласта

Хессен на содержание газа подтвердило, что сам пласт невыбро-соопасен и выбросы можно ожидать только из пласта-спутника. Были получены данные по акустическому анализу штыба 31 скважин, пробуренных в кровле, и 49 скважин, пробуренных в забое. Кроме того, было проведено сравнение данных акустического метода с керновым по 7 скважинам кернавого бурения. Результаты показали, что акустический метод, так же как и кернавый, позволяет отчетливо выделить выбросоопасные зоны пласта-спутника.

Разделение керна на диски в выбросоопасных зонах объясняется определенным напряженным состоянием пород. Оно отражает состояние выбросоопасной зоны. Этим кернаый метод отличается от акустического, который характеризует только газоносность. Так, если акустическим методом удастся выделить только зону, насыщенную газом, то кернаый метод позволяет зафиксировать границу этой зоны. Результаты, полученные кернаым и акустическим методами, в целом совпадают.

Итак, исследования немецких ученых показали, что акустический метод прогноза выбросоопасных зон является быстрым и надежным. Однако при этом следует учитывать, что содержание газа в породе не является решающим фактором выброса, хотя для того чтобы выброс произошел, необходимо определенное содержание газа. Возможность реализации выброса зависит прежде всего от напряженного состояния соответствующего участка массива, от механических свойств породы и т. д. Порода с определенным содержанием газа, находящаяся в зоне высокой напряженности, склонна к выбросу больше, чем порода с таким же содержанием газа, но с незначительной напряженностью. Поэтому следует оценивать все факторы одновременно. Что касается данных акустических измерений, то следует обращать внимание не на абсолютные значения измерений (которые в конкретных случаях могут существенно отличаться), а на их относительное изменение. Если происходит скачкообразное повышение содержания газа, то следует считаться с возможностью выброса.

Для прогнозирования с помощью акустического метода пригоден любой вид бурения, если только оно позволяет с 1 м скважины получить 10—20 г бурового штыба необходимой крупности. Для прогнозирования подходит отдельное помещение, в котором нет шумовых помех (например, специально оборудованная камера в околоствольном дворе).

С помощью акустического метода, кроме прогнозирования выброса, удалось доказать наличие защитной породной стенки перед зоной выброса в тех случаях, когда выбросоопасные зоны были полностью пересечены разведочными скважинами. Так, на рис. 46 показано изменение содержания газа в штыбе по длине скважины, пересекающей небольшую зону выброса. Можно видеть, что участок с высоким содержанием газа имеет ширину всего 1 м. Однако происшедший после взрывания выброс начался в 1 м перед этой зоной, где содержание газа было незначительным. Из

этого следует, что слой породы с незначительным содержанием газа, находящийся между забоем и выбросоопасной зоной, может действовать как защитная стенка.

На толщину защитной стенки в конкретных случаях влияют следующие факторы: содержание газа в газонасыщенной зоне и ее размер, вид связи газа с солью, механические свойства газоносных пород, давление газа и напряженное состояние газонасыщенной зоны, прочность породы и напряженное состояние защитной стенки.

В частности, существованием защитных стенок можно объяснить и выбросы, происходящие в течение нескольких минут. По-видимому, в этих случаях между близрасположенными выбросоопасными участками имеются защитные стенки недостаточной толщины. Поэтому выброс из ближайшей к забою зоны разрушает защитную стенку последующей зоны, затем происходит выброс из следующей зоны и т. д. В этих случаях порода защитной стенки будет выбрасываться медленнее, чем порода выбросоопасного участка.

Вышеописанные работы были проведены на рудниках бассейна Верра. Принципиальная возможность применения этого метода для прогнозирования выбросов была проверена и для калийных рудников Южного Гарца. На рудниках «Томас Мюнцер» и «Карл Либкнехт» были испытаны пробы каменной соли, хартзальца и карналлита. Затруднения были в том, что при бурении шпуров длиной до 3 м удавалось получить очень мало штыба с крупностью зерна более 3 мм. Кроме того, трудности возникали из-за большого количества нерастворимых компонентов (около 10%) и отсутствия данных о том, как они влияют на содержание газа.

В. Ф. Коротаевым (ППИ) в 1967—1968 гг. были приведены испытания акустического метода с целью прогноза выбросов карналлита и газа в условиях карналлитового пласта В Соликамского рудника. Для оценки газонасыщенности по уровню шума при растворении бурового штыба в воде был изготовлен прибор, состоящий из акустического стакана и шумомера. Исследования были проведены в двух очистных забоях — камерах 15 и 17 блока 75. Отбор проб бурового штыба производился при бурении шпуров длиной до 5 м. С помощью сит для анализа выделялись классы — 5+ +3 мм и —3+2 мм. В акустическом стакане растворяли определенную навеску пробы. Уровни шума записывались в течение всего времени растворения. После обработки данных измерений были получены графики изменения уровня шума во времени при растворении штыба (рис. 48). Из графиков видно, что уровень шума при растворении штыба сильногазонасыщенной породы выше, чем слабогазонасыщенной. Более существенное различие в уровне шума характерно для штыба класса — 5+3 мм: 8—11 дБ по сравнению с 4—6 дБ для класса — 3+2 мм.

Исследования показали, что с помощью акустического метода на карналлитовом пласте можно выделять зоны с повышенной

газоносностью. С целью прогнозирования необходимо отбирать пробы бурового штыба крупностью 3—5 мм. Для практического использования метода была разработана временная инструкция.

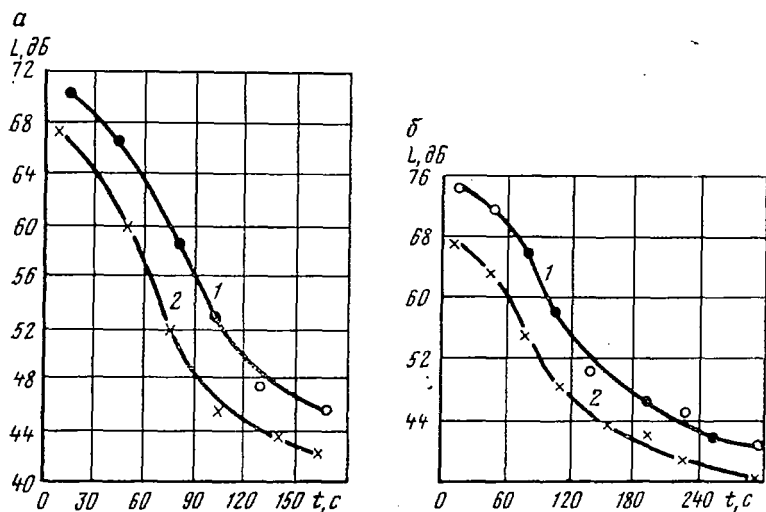


Рис. 48. Изменение уровня шума во времени при растворении карбонатного штыба:

а — крупностью — 3+2 мм; б — крупностью — 5+3 мм; 1 — более газоносная порода; 2 — менее газоносная порода

Однако из-за высокой чувствительности к внешним шумам прибор оказался непригодным при механизированной добыче солей. В 1972 г. был разработан новый прибор (рис. 49), с помощью которого в толще промышленных пластов и вмещающих пород Второго Березниковского рудника удалось выделить выбросоопасные слои на пластах Красном I, А и В. Установлено, что данный метод может быть применен для точного определения местоположения выбросоопасных зон.

Испытания этого прибора на Индерском руднике показали высокую надежность акустического метода. При проведении прогноза в течение 23 проходческих циклов было предсказано четыре выброса. Этот прогноз подтвердился.

Фрайбергский прогноз по давлению газа основан на повышенном по сравнению с обычным газовыделением из шпуров и скважин, пробуренных в выбросоопасных зонах массива. Известно, что выбросоопасная порода имеет относительно более высокую газоносность и, по-видимому, газопроницаемость.

Газовый поток, выделяющийся из стенок скважины, пробуренной в газоносной породе, создает напор. При герметизации скважины манометр герметизатора фиксирует давление выходящего из скважины газа. В слабогазоносных, невыбросоопасных породах

давление газа в шпуре или скважине ничтожно, в выбросоопасных зонах оно измеряется десятками долями атмосферы и более.

Из трех рассмотренных методов инструментального прогнозирования наиболее экономичен прогноз по давлению газа, поэтому он чаще всего применяется.

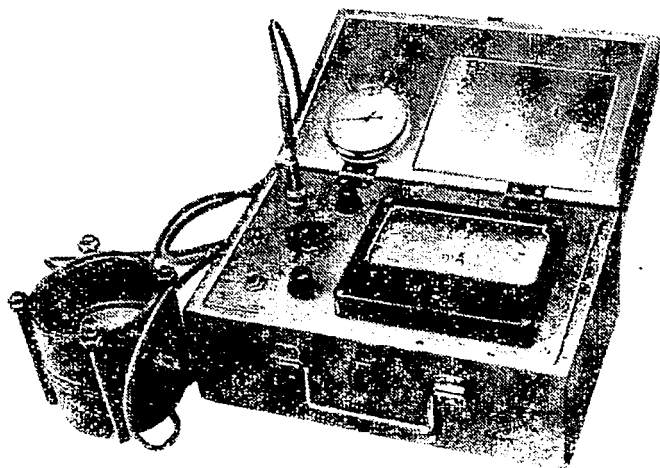


Рис. 49. Прибор для прогноза выбросов акустическим методом, разработанный в Пермском политехническом институте

Керновый прогноз применяется в основном при проведении эксплуатационной разведки, когда бурятся скважины с отбором керна (не специально с целью прогноза, а для других целей, например, для петрографических и химических исследований). Поскольку прогноз по давлению газа может быть осуществлен только в свежепробуренной скважине (при времени существования ее не более 10—15 мин), то наиболее универсальным оказывается акустический метод. Таким образом, каждый из трех методов имеет свою обширную область применения.

§ 4. Выбор мероприятий по предупреждению внезапных выбросов карналлита и газа

Выше были рассмотрены методы управления выбросами соли и газа, разработанные в ГДР для условий буровзрывной выемки. По-видимому, эти методы (планомерное провоцирование выбросов или ограничение их величины) в сочетании с прогнозированием применимы при разработке карналлитового пласта *В* Верхнекамского месторождения. Безусловно, их практическому использова-

нию должен предшествовать шахтный эксперимент по отработке паспортов буровзрывных работ. Необходимы также передвижные буровые станки для бурения скважин большого диаметра.

Вместе с тем близость водоносных горизонтов к рабочим пластам на многих участках месторождения требует изыскания метода предупреждения выбросов карналлита и газа.

Выбороопасные пласты различных горных пород, содержащие газ, имеют общие признаки. Главные из них — повышенная напряженность, упругость и хрупкость пласта или его участка, повышенная газоносность и связанная с нею пониженная механическая прочность. Поэтому мероприятия по предупреждению внезапного выброса обычно направлены на уменьшение напряженного состояния массива; уменьшение энергии газа, содержащегося в пласте; изменение физико-механических свойств пласта в сторону уменьшения его упругости, хрупкости и прочности и увеличения пластичности. Есть и другие мероприятия, направленные на повышение устойчивости и торможение внезапных выбросов или на провоцирование их. Все мероприятия В. В. Ходот разделяет на региональные и локальные [24].

Региональные мероприятия охватывают большие области пласта или свиту пластов. Примером их является разработка защитных пластов и предварительная дегазация пласта.

Локальные мероприятия применяются для отдельных забоев. К ним относятся специальные методы управления кровлей (полное обрушение), бурение опережающих скважин, создание опережающих щелей и врубов, возведение опережающей крепи и усиленное крепление забоя, сотрясательное взрывание, различные методы гидравлической обработки пласта (нагнетание жидкостей в пласт) и специальные методы добычи (гидроотжим).

Рассмотрим перечисленные способы с точки зрения возможности их применения при разработке карналлитового пласта В Верхнекамского месторождения.

Защитные пласты разрабатываются с целью подработки или надработки выбороопасного пласта, т. е. частичного разрушения междупластья, что приводит к снятию повышенных напряжений и частичной дегазации выбороопасного пласта. Ввиду условий разработки Верхнекамского калийного месторождения, не допускающих каких-либо сдвижений боковых пород с нарушением их сплошности, этот метод в данных условиях неприемлем. Такой вывод основывается на опыте разработки шахтных полей Соликамского и Первого Березниковского рудников, где карналлитовый пласт подрабатывается нижележащими сильвинитовыми пластами, однако происходит большое число выбросов карналлита и газа.

Метод управления кровлей полным обрушением, применяющийся для этой цели на выбороопасных пластах, в данных условиях также неприменим.

Дегазация выбороопасного пласта, применяющаяся для сни-

жения содержания газа в пласте и, следовательно, для снижения газового давления в пласте, испытывалась неоднократно на Верхнекамском месторождении и не дала каких-либо положительных результатов из-за неравномерности распределения выбросоопасных участков и низкой газопроницаемости карналлитового пласта. Методы повышения устойчивости пласта и торможения внезапных выбросов с помощью усиленной крепи также не могут здесь применяться ввиду большого сечения выработок и отсутствия крепи.

Сотрясательное взрывание увеличенными зарядами взрывчатого вещества провоцирует внезапный выброс. Оно вызывает некоторое рыхление прилегающего массива, его дегазацию, а также смещение вглубь массива зоны концентрации напряжений.

На Верхнекамских рудниках применяется в основном сотрясательное взрывание. Положительная сторона его — безопасность последующей работы людей в забое в отношении «запоздалого» выброса. Отрицательные стороны его были изложены выше.

Все разновидности метода нагнетания жидкостей в пласт (увлажнение массива, гидроразрыв, внутримассивный гидроразрыв, гидрорыхление, гидроотжим) преследуют целью изменение некоторых физико-механических свойств пласта и в конечном счете — уменьшение напряженности выбросоопасного участка и снижение активности газа, содержащегося в пласте. Достаточно хорошая регулируемость процесса нагнетания (необходимый режим и радиус воздействия) свидетельствует также в его пользу. Поэтому метод нагнетания жидкостей в пласт для борьбы с внезапными выбросами получает все большее распространение на угольных шахтах и сейчас применяется во всех угольных бассейнах страны, разрабатывающих выбросоопасные пласты.

Таким образом, из рассмотренных методов борьбы с внезапными выбросами нагнетание жидкости представляется наиболее приемлемым. Этот метод был испытан авторами при участии сотрудников Пермского политехнического института В. Л. Водопьянова и Н. Ф. Красюка в 1967—1968 гг. на Соликамском руднике.

Кроме метода нагнетания, по-видимому, принципиально приемлемы еще два известных метода предупреждения выбросов. Это торпедирование пласта в глубине массива впереди забоя, имеющее целью создание в массиве сети искусственных трещин, которые в условиях карналлитового пласта не только способствовали бы уменьшению напряженности, но и повышению газопроницаемости и дегазации пласта. В последнее время показал положительные результаты метод предупреждения выбросов породы частичной разгрузкой участка пласта впереди забоя от повышенных напряжений путем создания по контуру выработки, исключая подошву, разгрузочной щели. Этот метод также не вызывает принципиальных возражений против его опробования в условиях карналлитового пласта В.

ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА НАГНЕТАНИЯ ЖИДКОСТИ В ПЛАСТ С ЦЕЛЮ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ

§ 1. Лабораторные исследования взаимодействия жидкостей с соляными горными породами

Метод нагнетания жидкости в пласт для условий калийных рудников исследовался впервые. Анализ сведений по применению этого метода на угольных шахтах показал сложность взаимодействия жидкости с горной породой в процессе нагнетания. В связи с этим еще не создано единого метода, позволяющего оценить ослабление массива в результате нагнетания, а также рассчитать параметры нагнетания для любых условий.

Эти же причины не позволили ответить на вопросы: возможно ли в принципе применение метода нагнетания на калийных пластах, каким приблизительно может быть результат воздействия жидкости на калийную горную породу, какую необходимо принять жидкость для нагнетания и т. д. Очевидной была постановка специальных экспериментов.

Сначала были проведены лабораторные исследования с целью выбора жидкости для нагнетания, проверки возможности разрушения калийных пород в режиме трещинообразования и определения разрушающего давления, выяснения механизма взаимодействия жидкостей с породой (числа, направления, скорости образования и размеров трещин, изменения прочности пород в результате нагнетания), оценки влияющих факторов (давления, вязкости, адсорбции и растворения). На втором этапе проводились шахтные исследования с целью проверки работоспособности метода для массива калийной горной породы и лабораторных данных (разрушающего давления, направления и скорости трещинообразования и т. д.). На заключительном этапе исследований предусматривались промышленные испытания метода с целью предупреждения внезапных выбросов карналлита и газа.

Методика лабораторных исследований по разрушению образцов заключалась в следующем.

В образец, помещаемый в условия всестороннего сжатия, с одной стороны производится нагнетание жидкости до его разрушения трещинами и выхода жидкости с противоположной стороны, сообщаемой с атмосферой. Если в течение определенного времени разрушение не произошло, нагнетание прекращается, а образец испытывается на сжатие. Если образец разрушился, приступают к изучению и описанию характера разрушения.

При выборе рабочей жидкости учитывали ее фильтрационные свойства, зависящие от смачивающей способности и вязкости, растворяющую способность, наличие воды в достаточном количестве и стоимость в шахтных условиях. Наиболее распространенные и дешевые жидкости — вода, а для калийных рудников — рассолы (насыщенные при данной температуре растворы калийных солей в воде). Сравнительная характеристика интересующих нас свойств воды и рассолов: вязкость воды в большинстве случаев (за исключением однородных растворов KCl в воде) меньше вязкости рассолов; вода легко растворяет, а следовательно и хорошо смачивает поверхность калийной соли, тогда как рассол не должен оказывать растворяющего воздействия, а также хуже смачивать соль.

Такая сравнительная характеристика свойств выбранных жидкостей недостаточна для того, чтобы отдать предпочтение одной из них, так как она не позволяет оценить количественное влияние этих свойств на ослабление прочности соли. Кроме того, существующая технология добычи калийных солей не допускает применения воды, в связи с чем на калийных рудниках нет водопроводов. Тем не менее для исследования были приняты вода, поскольку ее свойства предпочтительны, и рассолы, часто имеющиеся на калийных рудниках.

Вопросам моделирования образования трещин гидровзрыва посвящены работы многих авторов. Условия подобия при моделировании Ю. П. Желтовым [11] выведены исходя из физических представлений о механизме гидравлического разрыва. Параметры подобия установлены из уравнений теории гидроразрыва.

Для того чтобы процессы трещинообразования в модели и натуре были подобными, должны быть соблюдены условия [11]:

$$\left(\frac{\gamma H Q^2 \mu^2}{k^3 E^3} \right)_{\text{н}} = \left(\frac{\gamma H Q^2 \mu^2}{k^3 E^3} \right)_{\text{м}}, \quad (33)$$

$$\left(\frac{Q \mu E^2}{\gamma^3 H^3 L^3} \right)_{\text{н}} = \left(\frac{Q \mu E^2}{\gamma^3 H^3 L^3} \right)_{\text{м}}. \quad (34)$$

После преобразований получим

$$\left(\frac{\gamma H L^{6/7}}{k^{3/7} E} \right)_{\text{н}} = \left(\frac{\gamma H L^{6/7}}{k^{3/7} E} \right)_{\text{м}}, \quad (35)$$

где γ — объемный вес пород; H — глубина залегания; Q — расход жидкости; μ — вязкость жидкости; γH — величина горного

давления; k — коэффициент фильтрации; E — модуль упругости; L — длина трещин.

Создавая в эксперименте все условия, аналогичные натуре: применение тех же рабочих жидкостей, использование естественных калийных пород ($k_n = k_m$, $E_n = E_m$), создание давления на образец, соответствующее глубине разработки ($\gamma H_n = \gamma H_m$), получим соответствие длины трещин в натуре и модели ($L_n = L_m$).

Исходя из главной цели исследования метода нагнетания для борьбы с внезапными выбросами при разработке карналлитового пласта для экспериментов были приняты образцы карналлита. Невысокая прочность, гигроскопичность, химическая неустойчивость карналлита, трудности в изготовлении и хранении его образцов ограничивали объем эксперимента. Поэтому испытания проводились и на сильвинитовых образцах. При этом имелось в виду, что качественная картина разрушения калийных горных пород при нагнетании, по-видимому, должна быть одинаковой и в дальнейшем возможно применение метода нагнетания и на сильвинитовых пластах.

Исследования проводились на образцах выбросоопасного слоя карналлитового пласта B_6 и сильвинитового пласта Красного II. С точки зрения физико-химического взаимодействия жидкости с поверхностью размер образцов не имел значения. Если же рассматривать данный процесс разрушения как один из видов испытания на механическую прочность, то для получения данных о прочности можно пользоваться образцами сечением $0,03 \times 0,03$ м и более — для каменной соли и сильвинита и сечением $0,1 \times 0,1$ м и более — для карналлита.

Образцы карналлита были взяты из двух мест: первая проба — в месте расширения шестого слоя, вторая — в месте его утонения, так как, по данным работы [6], прочность карналлита в этих местах различна.

Образцы испытывались на стотонном гидравлическом прессе. Время нагружения образца находилось в пределах 60 ± 10 с. Испытывались образцы сильвинита пласта Красного II кубические $0,05 \times 0,05 \times 0,05$ м, т. е. такие же, какие были затем использованы при изучении процесса нагнетания. Сжатию было подвержено 10 образцов, 6 из которых были обработаны на шлифовальном станке, а 4 — ручной ножовкой.

Предел прочности на сжатие по первым шести образцам составил $\sigma_{сж} = 344$ кгс/см², по вторым четырем образцам $\sigma_{сж} = 313$ кгс/см². Образцы худшей обработки дали меньшее значение предела прочности, по-видимому, потому, что фактическая площадь соприкосновения поверхности образца с прессом оказывается несколько меньшей, чем принималась при подсчете.

Лабораторная установка состояла из насоса ГА-364, высоконапорного трубопровода и камеры, в которую помещался испытуемый образец с длиной ребра 0,05 м. В камере конструкции

ПермНИУИ с помощью зажимного устройства создавались условия объемного сжатия (рис. 50).

Со стороны нагнетательной трубы в стальном корпусе и резиновом вкладыше имеется отверстие диаметром 0,006 м, через которое жидкость воздействует на образец; с противоположной стороны образец сообщается с атмосферой через отверстие в стальной бобышке диаметром 0,02 м.

Сбоку в стальном корпусе камеры имеется отверстие с резьбой для подсоединения пьезоэлектрического датчика к резиновому вкладышу, с помощью которого и электронного осциллографа «Орион» замеряется давление зажатия образца.

Камера для испытания образцов больших размеров представляет собой стальную оболочку толщиной 0,02 м, закрывающую образец с шести сторон, с наклеенным на нее изнутри слоем резины толщиной 0,02 м для обеспечения более плавного и равномерного зажатия образца.

В центре одной из шести стенок камеры имеется отверстие с резьбой для ввинчивания гидрозатвора. Гидрозатвор с помощью высоконапорного шланга соединяется с нагнетательным трубопроводом.

Давление зажатия образцов составляло 60—70 кгс/см², что соответствует глубине залегания пласта 240—280 м при среднем объемном весе вышележащих пород 2,5 тс/м³. Давление зажатия больших образцов не замерялось.

При испытании больших образцов нагнетание производилось в «шпуры», пробуренные в образцах электродрелью. В образце в зависимости от его размеров бурился один или два шпура диаметром 11—12 мм на глубину, равную $\frac{2}{3}$ длины параллельной шпуру грани образца. Шпур герметизировался на половину длины резиновой трубкой (типа шлангового гидрозатвора) так, что жидкость действовала на образец внутри него на длине шпура, равной $\frac{1}{3}$ длины образца.

Необходимое число опытов, согласно методам вариационной статистики, определялось по формуле

$$n = \frac{\omega^2}{P^2}, \quad (36)$$

где ω — вариационный коэффициент, %; P — показатель точности, %.

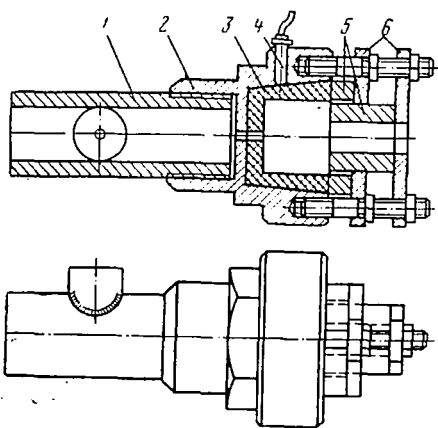


Рис. 50. Камера для испытания кубических образцов с ребром длиной 5 см:

1 — труба; 2 — камера; 3 — вкладыш; 4 — датчик; 5 — бобышки; 6 — фланцы

Поскольку подобного рода эксперименты для калийных пород не проводились, значения вариационного коэффициента и показателя точности неизвестны. Считая данные опыты своего рода испытаниями образцов на прочность, приняли вариационный коэффициент равным 20% и показатель точности 10%. Необходимое число опытов 4.

Давление, при котором должно было производиться нагнетание, устанавливалось заранее. Нагнетание велось параллельно или перпендикулярно напластованию. При каждом значении давления и определенном напластовании испытывали по 4—6 образцов. Фиксировалось время и давление нагнетания. На экране осциллографа наблюдался процесс изменения напряжений в образце при нагнетании. Нагнетание велось до разрушения образца, о чем свидетельствовал выход жидкости с противоположной стороны образца, резкий спад давления по манометру и напряжений в образце по осциллографу. Если в течение 3 мин образец не разрушался, нагнетание прекращалось. В этом случае при отсутствии малейших признаков разрушения образец подвергался испытанию на сжатие.

Такие исследования были проведены при давлениях воды от 10 до 120 кгс/см² и давлениях рассола — от 50 до 150 кгс/см². Испытано всего более 170 образцов, из них около 110 — при нагнетании воды и около 60 — при нагнетании рассола.

При нагнетании воды отдельные трещины в образцах начинали появляться уже при давлении 50 кгс/см². По-видимому, это нижний предел давления, необходимый для разрушения наименее прочных связей в силвините. При таком давлении разрушилось полностью 30% образцов.

При повышении давления нагнетания интенсивность разрушения образца увеличивалась — увеличивалось число трещин. Визуальный осмотр показал, что разрушение идет всегда по плоскостям спайности между кристаллами. Часто происходил отрыв отдельных кристаллов и сростков нескольких кристаллов по поверхности трещин. Разрушенных, раздавленных кристаллов не наблюдалось. Скругленность граней и углов кристаллов свидетельствовали о том, что за короткое время разрушения образца, измеряющееся секундами, успевало проявиться растворяющее действие воды. Ширина трещин достигала нескольких миллиметров.

При увеличении давления нагнетания увеличивалась также скорость образования трещин, т. е. уменьшалось время разрушения образца или, что то же самое, время нагнетания (рис. 51). При давлениях воды выше 100—120 кгс/см² образец разрушался практически мгновенно. Коэффициент корреляции, подсчитанный по этим данным, равен 0,7, ошибка коэффициента корреляции $\pm 0,1$, его достоверность 7, что подтверждает наличие отрицательной линейной корреляционной связи между давлением воды и временем разрушения образцов.

Преимущественного развития трещин по напластованию не отмечено; обычно трещины пронизывали образец в самых различных направлениях. Однако более равномерное и мелкое разрушение происходило при нагнетании воды в направлении, перпендикулярном напластованию. Характер разрушения образцов показан на рис. 52.

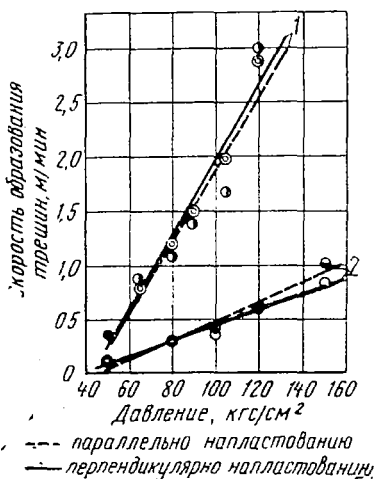


Рис. 51. Зависимость скорости образования трещин в образцах сильвинита от давления воды или рассола при нагнетании:
1 — нагнетание воды; 2 — нагнетание рассола

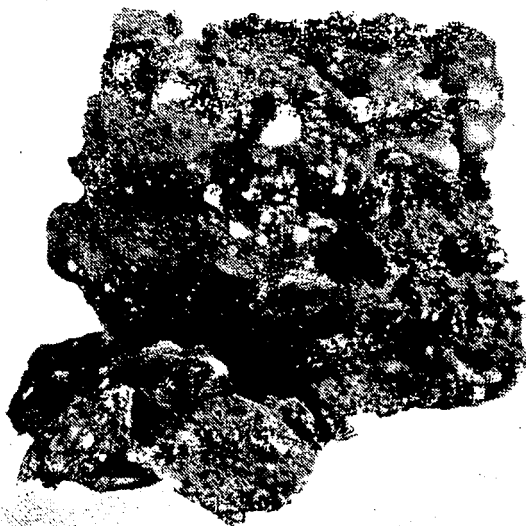
Скорость образования трещин подсчитывалась для наименьшей длины трещины, разрушающей образец, т. е. для 0,05 м. Она увеличивалась от 0,006 м/с при давлении воды 50 кгс/см² до 0,05 м/с при давлении воды 120 кгс/см². Эти данные приблизительно совпадают с данными американской кампании «Diamond Alkali», впервые применившей при разработке соляных месторождений способом подземного растворения гидравлический разрыв пласта для создания сбоек между рассолодобывающими скважинами. Скорость образования трещин при этом находится в пределах 0,002—0,036 м/с (от 0,12 до 2,14 м/мин.)

Рассол, применяемый для нагнетания, представлял собой насыщенный при температуре 20°С раствор карналлита в воде плотностью 1210 кг/м³ со следующим составом растворенного вещества: MgCl₂ — 94,98 кг/м³; KCl — 89,82 кг/м³; NaCl — 134,98 кг/м³; CaSO₄ — 2,03 кг/м³; нерастворимый остаток — 0,12 кг/м³.

В результате нагнетания рассола было установлено, что характер разрушения образцов водой и рассолом различен. Образование трещин при нагнетании рассола начинается при давлении приблизительно 80 кгс/см². Интенсивность разрушения с увеличением давления увеличивалась, но оставалась меньшей, чем при таких же давлениях воды. Трещины в разрушенных рассолом образцах настолько тонки, что часто неразличимы. Осциллограф часто не фиксирует уменьшения напряжений в образце при его разрушении или фиксирует очень незначительное их уменьшение. Образец разделяется на части по образовавшейся трещине только при простукивании образца, а иногда при разделении его острым тонким предметом.

По данным этих исследований была подсчитана энергоёмкость разрушений. Различие в энергоёмкости разрушения образцов при нагнетании воды и рассола показано на рис. 53.

a



б



Рис. 52. Характер разрушения кубических образцов сильвинита с ребром длиной 5 см при нагнетании воды в направлении:
a — параллельном напластованию; *б* — перпендикулярном напластованию

Оставшиеся неразрушенными после нагнетания воды и рассола образцы были испытаны на сжатие (табл. 16).

Все образцы после нагнетания воды имели пониженную прочность. Особенно большое понижение прочности показали образцы, подвергшиеся более длительному воздействию воды по сравнению с другими (образец 47) или более высокому давлению (образец 59). Снижение прочности без видимых признаков разрушения

можно объяснить проникновением незначительного количества воды между кристаллами за счет адсорбционных сил и, возможно, межкристаллическим растворением. Адсорбционные эффекты и скорость адсорбции с повышением давления воды незначительно повышаются.

Образцы после нагнетания рассола не показали снижения прочности (за исключением образца 125), что можно объяснить этими же причинами: ввиду того что рассол плохо смачивает и не растворяет соль и имеет более высокую вязкость, проникновение его в ультратрещины между кристаллами произойти не могло.

Образцы, не разрушенные при нагнетании воды, но затем выдержанные в течение двух месяцев, при последующем испытании на сжатие не показали снижения прочности. Очевидно, за это время произошло заживление трещин в результате процессов перекристаллизации.

Для проверки данных по характеру разрушения сильвинита, полученных при испытании образцов малых размеров, были проведены опыты по нагнетанию в образцы больших размеров. Ввиду того что при испытании образцов малых размеров значительно больший эффект разрушения был получен при нагнетании воды, образцы больших размеров испытывались только при нагнетании воды. Давление нагнетания заранее не устанавливалось, оно достигало в каждом случае предельной величины, при которой происходил гидроразрыв. Величина давления разрушения образца в данном случае характеризовала прочность его на гидроразрыв.

Поскольку разрушение образцов больших размеров велось всегда при критическом давлении, скорость образования трещин была несколько большей, чем показано на рис. 51. Время разрушения больших образцов не замерялось. Оно соответствовало времени разгона насоса до величины критического давления, при

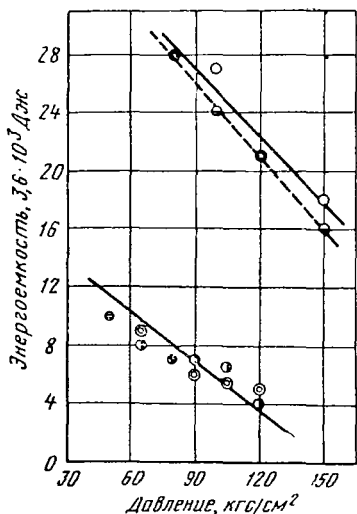


Рис. 53. Зависимость энергоемкости разрушения образцов сильвинита от давления воды или рассола при нагнетании (условные обозначения см. на рис. 51)

котором разрушение происходило практически мгновенно, и составляло 1—2 с.

Таблица 16

№ образца	Давление жидкости при нагнетании, кгс/см ²	Время нагнетания, с	$\sigma_{сж}'$, кгс/см ²	$\sigma_{сж. ср}'$, кгс/см ²
Неослабленные образцы				
1	—	—	317	} 313
2	—	—	332	
3	—	—	302	
4	—	—	302	
Образцы после нагнетания воды				
16	20	90	217	} 207
49	65	60	233	
54	65	120	248	
47	65	240	190	
59	90	90	156	
Образцы после нагнетания рассола				
114	50	60	413	} 316
117	50	60	299	
118	50	60	345	
119	80	60	285	
121	80	60	332	
122	80	60	375	
125	100	60	196	
146	150	6	286	
Образцы после нагнетания воды, выдержанные в течение двух месяцев				
17	50	180	325	} 314
10	40	2	376	
52	65	60	275	
56	50	60	308	
65	80	60	287	

Характер разрушения образцов больших размеров при нагнетании показан на рис. 54.

Опыты по нагнетанию воды в эти образцы подтвердили полученные при испытании малых образцов данные по величине давления и характеру их разрушения. В результате обработки данных получено, что среднее арифметическое величины критического давления составляет (85 ± 5) кгс/см², вариационный коэффициент 29%.

a



б



Рис. 54. Характер разрушения образцов сильвинита больших размеров при нагнетании:
a — в один шпур; *б* — в два шпура

Поскольку большинство закономерностей разрушения силвинитовых образцов можно распространить и на карналлит, опыты по разрушению образцов карналлита при нагнетании воды и рассола проводились в основном с целью установления величины критического давления. Испытания карналлитовых образцов подтвердили большое различие в характере разрушения при нагнетании воды и рассола. Так, образцы, разрушенные водой, распадались на куски различной величины и их часто невозможно было собрать снова в образец, чтобы увидеть расположение трещин; поверхности трещин были обмыты, сглажены (рис. 55, 56).

Образцы, разрушенные рассолом, внешне часто казались целыми. При внимательном осмотре на поверхности образца обнаруживалась волосяная трещина. Для того чтобы проследить направление трещины, по направлению ее плоскости вставляли острый предмет типа ножа и слегка постукивали по нему. Трещина расширялась и проявлялась по всему образцу. Затем сложенный образец фотографировали (рис. 60). Образцы первой и второй проб показали одинаковую прочность на гидроразрыв.

Эти опыты позволили установить еще один существенный фактор, позволяющий объяснить различие в разрушении калийных солей при нагнетании воды и рассола.

По-видимому, при нагнетании рассола за короткое время разрушения образца рассол не успеваеt проникнуть по всей площади поверхности трещин и сколько-нибудь расширить их из-за давления внутри трещины. Причиной этому может служить низкая по сравнению с водой проникающая способность рассола, являющаяся следствием некоторых его свойств: значительно меньшая сила физико-химического взаимодействия рассола с поверхностью калийных пород, плохая смачиваемость их рассолом, т. е. большее сопротивление поверхностей трещин движению, а также большая вязкость рассола, т. е. меньшая по сравнению с водой его подвижность.

Обобщение результатов эксперимента дано в табл. 17.

Известно, что указанные свойства жидкости влияют на фильтрацию и распространение жидкости в массиве.

Смачивание — процесс, всегда предшествующий растворению. Поэтому природные калийные соли, как и все вещества, хорошо растворяющиеся в воде, абсолютно гидрофильны. Поверхность соли с огромной скоростью адсорбирует воду, а в полимолекулярном адсорбционном слое воды начинает растворяться. Благодаря интенсивному физико-химическому взаимодействию молекулы воды будут проникать в массив соли через все дефекты макро- и микро-структуры, т. е. будет происходить быстрое распространение воды в массиве. Этот процесс в первую очередь объясняет высокую проникающую способность воды в микротрещины соляных пород.

Насыщенный раствор данной соли в воде — рассол — не растворяет ее. Это говорит об уменьшении физико-химического взаимодействия поверхности соли с рассолом и характеризует



Рис. 55. Характер разрушения карналлитовых образцов при нагнетании воды:
а — первая проба; б — вторая проба



Рис. 56. Характер разрушения карналлитовых образцов при нагнетании рассола:
a — первая проба; *b* — вторая проба

Характеристика разрушения	Вода		Рассол	
	Сильвинит	Карналлит	Сильвинит	Карналлит
Разрушающее давление, кгс/см ²	50—130	15—35	80—150	30—45
Количество разрушенных образцов при одинаковом давлении (80 кгс/см ²), %	75	—	30	—
Число трещин в образцах	От 1 до 10 (среднее 4)	От 1 до 8 (среднее 4)	—	От 1 до 4 (среднее 2)
Ширина трещины, мм	До 5	До 10	1	1
Время разрушения образца при давлении 80 кгс/см ²	10	—	2—3	—
Энергия, затраченная на разрушение образца при давлении 80 кгс/см ² , 3,6·10 ⁶ Дж (кВт·ч)	0,007	—	0,028	—
Понижение прочности неразрушенных образцов:				
сразу после нагнетания, %	От 50 до 20 (среднее 33)	—	Нет	—
через 2 мес.	Нет	—	—	—

меньшую по сравнению с водой способность рассола проникать в тончайшие трещины.

Другое из рассматриваемых свойств — вязкость — имеет существенное значение в процессах движения жидкостей и связанной с ней кинетикой растворения. Так, в соответствии с законом Дарси, скорость фильтрации в каком-то направлении X определяется из уравнения

$$v_x = \frac{k'}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (37)$$

где k — проницаемость среды; μ — вязкость жидкости; $\frac{\partial p}{\partial x}$ — перепад давления жидкости на единицу длины.

Из уравнения (37) видно, что чем выше вязкость жидкости, тем при прочих равных условиях ниже скорость ее движения.

Данные Н. А. Чеснокова (табл. 18) характеризуют вязкость только однородных растворов различной степени насыщения при постоянной температуре +20°С.

Из табл. 18 видно, что увеличение концентрации раствора хлористого натрия до насыщения приводит к увеличению вязкости его примерно в 1,5 раза, а хлористого магния — более чем в 5 раз. Вязкость же раствора KCl при увеличении концентрации его снижается, но незначительно, и при насыщении составляет 0,9 вязкости воды.

Концентрация раствора, молярные доли	Вязкость водных растворов, 10^{-6} , м ² /с		
	NaCl	KCl	MgCl ₂
0,5	1,0396	0,9772	1,1851
1,0	1,0550	0,9548	1,3823
2,0	1,1347	0,9338	2,0187
3,0	1,2500	0,9078	3,1190
3,5	—	0,8992	—
4,0	1,3805	—	5,4630
5,0	1,5732	—	—

Однако промышленные рассолы калийных рудников многокомпоненты по составу и температура их может изменяться в значительных пределах. Поэтому необходимо было знать вязкость рассолов, которые могли быть использованы в шахтных условиях в некоторых пределах значений их температуры. В табл. 19 приведены данные по составу рассолов, вязкость которых определялась в лабораторных условиях*.

Таблица 19

№ п/п	Рассол	Содержание компонентов, кг/м ³						Плотность раствора, кг/м ³
		NaCl	MgCl ₂	KCl	CaCl ₂	CaSO ₄	Br	
1	Насыщенный хлористым натрием	305,6	0,548	8,2	—	3,4	0,104	1210
2	Насыщенный хлористым магнием	57,7	298,1	24,8	4,7	1,7	3,19	1275
3	Смешанный	156,8	107,3	89,1	—	4,69	0,65	1235

Состав рассолов выбран не случайно. Здесь 1 — рассол, используемый на Первом Березниковском руднике для гидротранспортирования закладочного материала; 2 — естественный рассол из камеры 20 пласта В; 3 — рассол, применяемый в лаборатории для нагнетания в образцы карналлита.

Вязкость рассолов определялась по методике, рекомендуемой кафедрой гидравлики Пермского политехнического института. Опытная установка (рис. 57) состояла из стеклянной ванны 1, заполненной водой, вертушки 3, термометра 4 и вискозиметра Пинкевича 2 с диаметром капилляра 0,0015 м. Более мелкие капилляры при низких температурах забивались кристаллами соли. Время истечения раствора в вискозиметре замерялось хроноско-

* Исследования вязкости рассолов проводились совместно с Г. Р. Ивановой.

пом с точностью 0,002 с. Температура среды, окружающей вискозиметр, измерялась обычным ртутным термометром с точностью 0,2° С. Для того чтобы раствор в вискозиметре оставался насыщенным, вязкость изменяли от высокой температуры к низкой. Температура воды в ванне изменялась от 30 до 0° С путем добавления льда. Замеры скорости истечения раствора делались через каждые 3—5° С и не менее 7 раз.

Кинематический коэффициент вязкости подсчитывался по формуле

$$\nu = CT_{cp} \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (38)$$

где $C = 0,3116$ сст/с — постоянная вискозиметра; $T_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ — среднее время истечения раствора при данной температуре; n — число замеров при данной температуре; T_i — время истечения испытуемой жидкости при температуре $i^\circ \text{С}$.

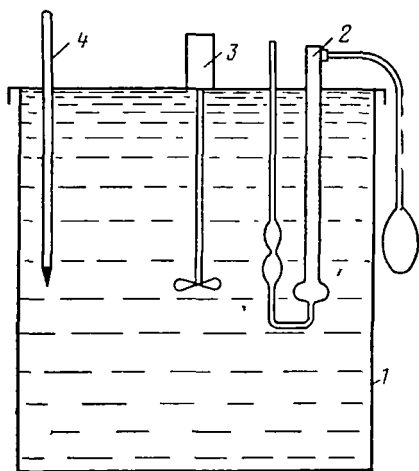


Рис. 57. Схема установки для определения вязкости рассолов

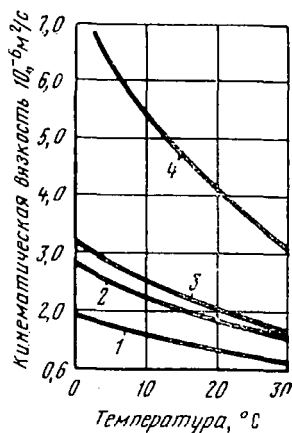


Рис. 58. Зависимость вязкости воды и рассолов от температуры:

1 — вода; 2 — рассол, насыщенный NaCl; 3 — рассол смешанного состава; 4 — рассол, насыщенный MgCl₂

Результаты замеров приведены на рис. 58. Принципиально зависимость вязкости от состава рассола остается такой же, как и для однородных растворов: присутствие хлористого магния наиболее сильно увеличивает вязкость, а присутствие хлористого калия — уменьшает.

Сравнение данных рис. 58 и табл. 20 показывает, что вязкость

промышленных насыщенных растворов при температуре 20° С на 13—14% отличается от вязкости однородных насыщенных растворов минеральных солей.

Полученные результаты подтверждают положение о влиянии вязкости рассола на скорость проникновения его в трещины при нагнетании. Так, согласно формуле (37), при прочих равных условиях скорость фильтрации рассолов в 2—5 раз меньше скорости фильтрации воды. Если еще учесть различие в физико-химическом взаимодействии этих жидкостей с поверхностями трещин, то в действительности различие в скоростях значительно больше. Разница в вязкости воды и рассола оказалась аналогичной разнице в скорости распространения трещин (см. рис. 51).

То, что растворение играет какую-то роль в разрушении, очевидно, и не требует доказательств. Однако, поскольку время разрушения образцов очень мало и измеряется секундами, возникает вопрос, может ли за столь короткое время существенно проявиться растворяющее действие воды.

Для более достоверной оценки роли фактора растворения в разрушении рассмотрим условия воздействия воды на поверхность соляной породы.

Вначале, с момента соприкосновения жидкости с образцом, жидкость заполняет шпур и давление ее на водопоглощающую поверхность шпура возрастает. В какой-то момент, при достижении критического давления, начинается образование трещин. Согласно нашим данным, средняя скорость развития отдельной трещины по радиусу от стенки шпура для сильвинита при нагнетании воды достигает 3 м/мин, при нагнетании рассола 1 м/мин. В наших условиях максимальная длина трещин не превышала 0,15 м, поэтому образование трещины (разрушение больших образцов) происходило практически мгновенно. Судя по характеру трещин, рассол не успевает за это время проникнуть в трещину и хоть сколько-нибудь размыть и расширить ее. Вода же, очевидно, проникает в трещину одновременно с ее образованием.

В описанных условиях растворение стенок шпура и образующихся трещин происходит в условиях статического и динамического напора воды.

В момент разрушения образца в нагнетательной системе происходит спад давления, так как вода получает выход через образовавшиеся трещины. Если в момент разрушения нагнетательный насос отключить, то вода еще некоторое время под остаточным давлением будет проходить через трещины, оказывая на их стенки динамическое и растворяющее воздействие. Если насос не отключать еще некоторое время, то вода будет проходить по трещинам под каким-то давлением с определенной скоростью, соответствующей скорости нагнетания. Скорость движения воды по трещинам при этом будет прямо пропорциональна давлению и расходу воды и обратно пропорциональна площади поперечного сечения трещин, по которым проходит вода.

Таким образом, сначала растворение идет в условиях статического, а затем динамического ее напора. Скорость растворения в таких условиях может зависеть от различных факторов. Наиболее существенные факторы — температура и скорость движения воды по трещинам и давление воды. Качественное влияние первых двух из перечисленных факторов изучено (скорость растворения с повышением температуры и скорости движения растворителя увеличивается), тогда как влияние последнего фактора, насколько нам известно, для калийных солей не изучалось.

Скорость растворения кубических образцов сильвинита исследовалась в неподвижной воде при давлении ее от 25 до 150 кгс/см² и в напорном потоке в тех же пределах значений давления по манометру насоса при постоянной температуре воды — 15°С. Для сравнения подобные эксперименты были проведены и в рассоле.

Лабораторная установка состояла из нагнетательного насоса, трубопровода и камеры растворения. Камера растворения представляла собой толстостенную металлическую трубу внутренним диаметром 0,09 м и длиной 0,15 м, в центре которой с помощью простого приспособления закреплялся образец. В процессе растворения вода действовала на все шесть граней образца, что охватывало все случаи положения поверхностей трещины в массиве. При растворении образца в статически напорной воде наружный конец камеры растворения закрывался заглушкой, камера заполнялась водой, затем в нее погружался образец. Давление воды в камере поддерживалось с помощью насоса, а постоянная величина его — автовключателем с помощью сливного устройства.

При растворении образца в динамически напорной воде на конец камеры через переходник навинчивался насадок. Регулирование давления при одном насадке осуществлялось изменением расхода воды с помощью сливного устройства насоса.

При каждом значении давления растворяли по 5—6 образцов. Образцы взвешивались с точностью до 0,0001 кг до и после растворения, затем просушивались в течение 1 ч в сушильном шкафу при температуре 100°С и снова взвешивались. Время растворения образцов было постоянным и составляло 3 мин. Вес растворенной части образца определялся как разность весов до растворения и после просушки. Разность относили ко всей площади поверхности образца за вычетом закрепленной ее части, которая не подвергалась растворению.

Скорость растворения образца в напорной воде практически постоянна и составляет примерно 0,7 кг с 1 м² поверхности в 1 мин и превышает скорость растворения образца в безнапорной неподвижной воде примерно в 10 раз.

Данные по растворению образцов в напорном потоке воды приведены в табл. 20.

Из табл. 20 видно, что при постоянном диаметре насадка увеличению напора соответствует увеличение скорости растворения образцов. Установлено, что увеличение только напора воды в

Таблица 20

Диаметр насадки, м	Давление по манометру, кгс/см ²	Скорость движения потока воды в камере растворения, м/с	Расход воды через насадку, 10 ⁻⁶ м ³ /с	Скорость растворения сильвинита, 10 ⁻³ кг/м ² ·с
0,003	25	0,12	468	9,7
0,003	50	0,17	662	12,9
0,003	80	0,215	840	15,4
0,003	115	0,258	1005	17,8
0,003	150*	0,295	1150	19,7
0,005	25	0,300	1166	19,6

* Единичный опыт.

исследуемых пределах не давало увеличения скорости растворения. Очевидно, скорость растворения увеличивается за счет возрастания скорости движения потока в камере растворения. Это доказывается контрольным опытом растворения образцов при давлении 25 кгс/см² и диаметре насадка 0,005 м. При одном и том же давлении воды по манометру 25 кгс/см², но при разных диаметрах насадков — 0,003 м и 0,005 м — скорость потока соответственно была равной 0,12 и 0,3 м/с, а скорость растворения во втором случае увеличивалась почти в 2 раза.

В исследованных пределах скорость растворения возрастает прямо пропорционально скорости потока и изменяется от 0,7 до 1,5 кг соли с 1 м² поверхности трещины в течение 1 мин, что соответствует толщине растворенного слоя поверхности от 0,4 до 0,9 мм.

Сравнение данных табл. 20 по скоростям движения потока воды, при которых определялась скорость растворения, и данных рис. 51 по скорости развития трещин в образцах показывает, что скорость растворения определена в меньших пределах значений, чем происходит развитие трещин (условно принимаем, что скорость потока воды при нагнетании соответствует скорости развития трещин гидроразрыва). Так, максимальная скорость потока была равна 1,8 м/мин, тогда как максимальная скорость развития трещин 3 м/мин. Получить скорость движения потока в камере растворения больше 1,8 м/мин не представлялось возможным из-за недостаточной производительности насосной установки. Если принять, что зависимость скорости растворения при дальнейшем увеличении скорости потока будет та же, то при больших скоростях, эффект от растворения будет также возрастать.

Аналогичные исследования скорости растворения образцов сильвинита в насыщенном рассоле показали, что растворение в рассоле не происходит.

Таким образом, эксперименты по определению скорости растворения соли в воде и рассоле доказали, что фактор растворения играет весьма значительную роль в разрушении калийных солей при нагнетании. Это выражается прежде всего в увеличении ширины образующихся трещин при прочих равных условиях от волосяных до нескольких миллиметров. Следовательно, при нагнетании воды в случае одинаковых затрат энергии и времени по сравнению с рассолом будет достигаться значительно большая интенсивность разрушения массива. При увеличении скорости нагнетания (увеличении расхода или давления воды) роль фактора растворения в разрушении будет возрастать.

§ 2. Шахтные испытания

Задачи шахтных исследований заключались в выяснении работоспособности метода и проверки лабораторных данных по разрушению в условиях массива. Необходимо было установить возможность надежной и быстрой герметизации нагнетательных шпуров при использовании воды в качестве рабочей жидкости, проверить разрушающее действие нагнетания (развитие трещин, их направление, протяженность и скорость образования), определить параметры нагнетания (давление, длину шпуров, расстояние между ними, глубину герметизации, длительность нагнетания).

Ввиду того что такой эксперимент на калийных рудниках проводился впервые, на первом этапе шахтные испытания осуществлялись в нерабочей выработке. Согласно данным работы [28], карналлитовый массив считается дренированным через 3 мес после его обнаружения на глубину 5 м, поэтому задача проверить дегазирующее влияние метода не ставилась.

На Первом Березниковском руднике была смонтирована установка для нагнетания воды в пласт. Она состояла из насоса ГА-364, установленного на 5-м западном выемочном штреке пласта Красного II между камерами 18 и 20, нагнетательного трубопровода диаметром 0,037 м длиной 50 м, протянутого по гезенку в камеру 20 пласта В с подсоединенным к нему высоконапорным шлангом длиной 60 м. Питание насоса водой осуществлялось из баков емкостью 2,5 м³, заполненных водой из вагонетки с помощью центробежного насоса ЗД-6, установленного на откаточном штреке.:

Методика испытаний заключалась в следующем. Шпуры одинаковой глубины бурились по схеме, позволяющей при нагнетании через один центральный шпур вести наблюдения по четырем контрольным шпурам — по двум вкрест напластования и двум по напластованию (рис. 59). Такая схема расположения шпуров позволила оценить радиус воздействия шпура на окружающий его массив (радиус ослабленной зоны), скорость и направление распространения трещин по различным направлениям от шпура

(продолжительность нагнетания), производить наблюдения за газоразделениями из контрольных шпуров.

Вода нагнеталась в количестве 5—10 л/мин. Фиксировалось время выхода воды в каждый контрольный шпур и ее давление. Расстояние от нагнетательного шпура до симметрично расположенных контрольных шпуров принималось одинаковым из условия одновременного выхода воды и изменялось от 0,3 до 1,1 м по мощности пласта m и от 0,9 до 2,5 м — по горизонтали*.

Для проверки и выбора способа герметизации испытывались гидрозатворы двух конструкций: заводской, с двумя расставленными манжетами, выпускаемый в комплекте с установками УНВ-2, и ручной, с двумя соединенными манжетами, изготовленный по чертежам ПермНИУИ.

Кроме того, была опробована герметизация шпуров с помощью цемента. Каждый из способов герметизации был опробован не менее чем на 5 шпурах. Установлено, что быстрая и достаточно надежная герметизация шпуров достигается при применении гидрозатворов с увеличенным числом уплотняющих элементов (от 2 до 4). Гидрозатвор, применяемый нами, позволил герметизировать шпуры диаметром 42 мм на глубину до 1,5 м.

Было произведено нагнетание в шпуры глубиной 2,5; 3; 3,5 и 4 м по вышеописанной схеме и затем нагнетание в шпуры глубиной 1,5 и 2 м по несколько другой схеме (без контрольных шпуров) для уточнения характера трещинообразования.

Для уменьшения числа шпуров их бурили по определенной сетке одинаковой длины в три ряда (рис. 60). Вначале воду нагнетали в шпуры среднего ряда (номера 1, 3, 5). Расположенные рядом верхний и нижний шпуры и шпуры среднего ряда были контрольными. Зона вокруг шпура, в которой производилось нагнетание, оказывалась ослабленной, даже если вода показывалась не изо всех контрольных шпуров. Это было подтверждено бурением, при котором шпуры часто попадали в трещины с водой.

При нагнетании происходило очень быстрое трещинообразование. Вода в контрольных шпурах, расположенных на расстоянии 0,3—2,5 м, появлялась через 5—10 с после включения насоса. Давление воды при нагнетании составляло 30—40 кгс/см².

На рис. 61 показаны зависимости радиуса ослабленной зоны от длительности нагнетания для различных направлений в пласте. Так, после нагнетания в течение 15 с радиус ослабленной зоны

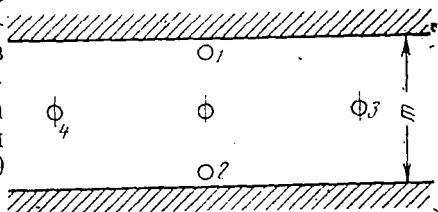


Рис. 59. Схема расположения шпуров при опробовании метода нагнетания:

1—4 — номера контрольных шпуров

* В одном случае при отсутствии рядом расположенных контрольных шпуров трещина вышла в шпур, расположенный на расстоянии 9,8 м от нагнетательного шпура.

вокруг нагнетательного шпура в направлении по напластованию оказывался примерно в 2 раза большим, чем перпендикулярно напластованию.

Наблюдения за процессом, нагнетания в 45 шпуров показали, что во всех случаях давление гидроразрушения, радиусы ослабленной зоны и скорости образования трещин вокруг нагнетательного шпура в исследованном диапазоне параметров (глу-

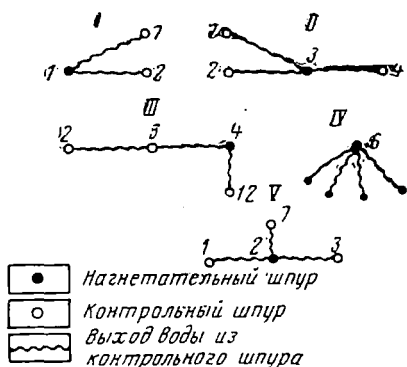
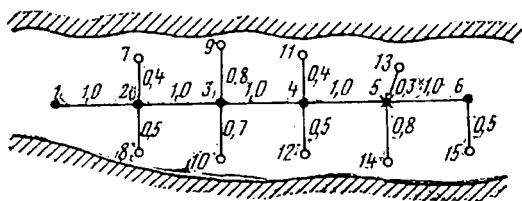


Рис. 60. Схема расположения первой серии шпуров длиной 2,5 м, нагнетания и выхода воды в контрольные шпуры:

I—VI — очередность нагнетания

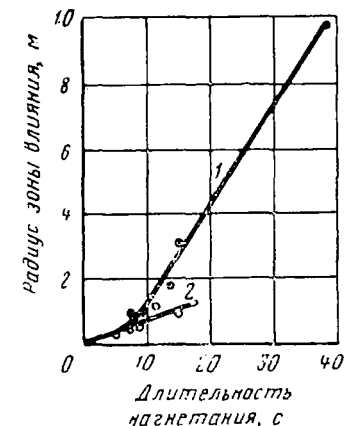


Рис. 61. Зависимость радиуса ослабленной зоны от длительности нагнетания:

1 — параллельно напластованию; 2 — перпендикулярно напластованию

бина шпуров 1,5—4 м, глубина герметизации 0,6—1,5 м) остаются постоянными. Следует отметить еще одну особенность процесса трещинообразования: почти во всех случаях (за исключением двух) трещины не выходили на обнаженную поверхность стенки камеры, а выходили в какие-либо шпуры, даже если расстояние до них было значительно большим, чем до обнаженной поверхности. По-видимому, образующиеся трещины представляли собой поверхности разрыва, приблизительно параллельные обнаженной поверхности массива. Проанализируем эти результаты.

Если исходить из положений о механизме образования трещин, разработанных в теории гидравлического разрыва нефтяных пластов, то направление трещин связывается прежде всего с величиной противодействующей силы — с горным давлением.

Стенка карналлитовой камеры представляет собой стенку междукammerного целика. Распределение напряжений в целиках карналлитовых камер известно [5]. Если рассмотреть три составляющих напряжений от горного давления в целике: вертикальную

σ_1 , горизонтальную по длине целика σ_2 и по его ширине σ_3 , то $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, т. е. в первую очередь должны образовываться вертикальные трещины в плоскости, параллельной стенке камеры, а наиболее маловероятным следует считать образование горизонтальных трещин.

Тот факт, что трещины не выходили на обнаженную поверхность массива, а распространялись в радиальных направлениях вокруг шпура, свидетельствует об образовании вертикальной плоскости разрыва, параллельной стенке камеры. Эта вертикальная плоскость разрыва распространялась значительно медленнее перпендикулярно напластованию, чем параллельно напластованию (см. рис. 61). То, что трещины, как правило, не выходят на обнаженную поверхность, а распространяются на некоторой глубине, объясняется концентрацией напряжений в краевых зонах целиков. Такое развитие трещиноватости при нагнетании полностью объясняется теорией гидравлического разрыва пластов. Отдельные случаи выхода воды на обнаженную поверхность можно объяснить наличием крупных трещин или наиболее ослабленных, трещиноватых участков.

Описанные эксперименты проводились в камере, отработанной тремя годами ранее. Несмотря на то что все нагнетательные шпуры были пробурены в дренированной зоне целиков по шестому слою пласта В, были замечены признаки газовыделений.

Всего было пробурено 95 шпуров глубиной от 1,5 до 4 м; из них наибольшее число шпуров глубиной 3 м. Более или менее сильные газовыделения при бурении шпуров были зафиксированы в пяти случаях — наблюдались толчки газа и выбросы штыба с глубины 2,5—3 м. Нагнетание было проведено всего в 45 шпурах. В шести случаях после нагнетания визуально отмечалось бурное выделение газа — сильное бурление воды, шипение и запах газа у шпуров, продолжавшиеся в течение 1—2 мин. В остальных случаях больших газовыделений визуально не отмечено.

После освоения технологии процесса нагнетания кроме визуальных наблюдений за газовыделениями производился отбор проб воздуха на химический анализ мокрым способом. По несколько проб было отобрано из окружающей атмосферы до и после нагнетания. Отбирались также пробы из контрольных шпуров до и после нагнетания, для чего устье шпура герметизировали резиновой пробкой и обматывали пластилином. Внутренняя полость шпура соединялась тонкой резиновой трубкой со стеклянной колбой, заполненной водой. Из перевернутой колбы по второй резиновой трубке вытекала вода, а по первой трубке поступал воздух из шпура. Часть воды в колбе оставляли для надежной герметизации отобранной пробы из окружающего воздуха и в перевернутом положении доставляли в химическую лабораторию калийного комбината на анализ.

В пробах атмосферного воздуха, взятых во время бурения шпуров, до и после нагнетания в большинстве случаев газа (метана

и водорода) не обнаруживалось. Нужно отметить, что рабочее место проветривалось непрерывно, так как камера № 20, в которой проводились работы, служила в качестве выработки, по которой подавалась свежая струя воздуха.

Во всех пробах, отобранных из шпуров, после нагнетания был обнаружен газ. В одних пробах суммарное содержание горючих и вредных газов — метана, водорода и углекислого газа — не превышало 2—3%. В других пробах содержание газов было значительным (до 40%), а содержание кислорода при этом уменьшалось до 2,2%; в этих же случаях улавливался газ и в пробах атмосферного воздуха: 0,16—0,18% CH_4 .

По-видимому, в случаях, незначительной газоносности по трещинам и нагнетательным шпурам выделялся рассеянный газ и газ, выделяющийся при растворении кристаллов в воде, и поэтому содержание газов в пробах было небольшим. Содержание газов в пробах было значительным в тех случаях, когда в зоне влияния нагнетательного шпура оказывалась зона, насыщенная газом.

При вторичном нагнетании через 1 сут в зоне наибольшего газовыделения газа в пробе из шпура почти не оказалось (0,2% CH_4). Это свидетельствует о хорошем качестве дренирования в результате предыдущего нагнетания.

§ 3. Механизм понижения прочности соляного массива при нагнетании

Ослабление массива — одно из необходимых требований применения метода нагнетания с целью предупреждения внезапных выбросов. Необходимо иметь правильное представление о механизме ослабления массива, для того чтобы наиболее эффективно применять метод нагнетания.

Для объяснения механизма ослабления прочности калийных солей воспользуемся полученными экспериментальными данными.

Главная особенность данного процесса состоит в том, что сила, вызывающая деформации горной породы (давление жидкости), является массовой или объемной, т. е. силой, действующей на каждый элемент данного участка пласта, в отличие от внешних сил, прилагаемых извне к поверхности породы (например, действие механических инструментов на горные породы). Кроме механического воздействия (давления жидкости) существенную, а иногда и определяющую роль в разрушении материала играют физико-химические процессы. В связи с этим особую роль приобретают структура, минеральный состав и трещиноватость горной породы.

Не принимая пока во внимание физико-химические процессы, рассмотрим процесс образования трещин при нагнетании в карналлитовом пласте. Почему трещины образуются всегда между кристаллами? На этот вопрос можно ответить следующим образом.

Всякая горная порода разбита системой открытых и потенциальных трещин — плоскостей механического ослабления: трещинами отдельности, плоскостями слоистости, сланцеватости, спайности и т. д. Этими трещинами и плоскостями ослабления порода всегда разбита на отдельные части — структурные блоки, которые представляют собой нечто целое. В сильвините — это кристаллы или их сростки, в карналлите — зерна или, как и в угле, — блоки, имеющие форму чаще всего параллелепипеда, ограниченного трещинами слоистости, отдельности, кливажа и др.

Калийные соли имеют кристаллическую структуру, связанность кристаллических тел обусловлена главным образом силами взаимодействия, возникающими между соприкасающимися кристаллами. Эти силы по своей природе не отличаются от сил, действующих внутри кристаллов, но по величине они меньше. Поэтому прочность на разрыв поликристаллических тел меньше прочности отдельных кристаллов, из которых оно состоит, и плоскости ослабления между структурными блоками при таких деформациях, как растяжение, сдвиг и изгиб, являются самыми слабыми местами с точки зрения механической прочности.

Таким образом, процесс образования трещин в карналлите это процесс развития, продолжения существующих или раскрытия потенциальных трещин (плоскостей механического ослабления).

Как нами установлено, зона трещиноватости, образованная в результате нагнетания, ограничена вертикальной плоскостью, параллельной обнаженной поверхности. Такая ориентация трещин находится в полном соответствии с теорией гидравлического разрыва [11, 25, 26]. Если в данном случае процесс трещинообразования рассматривать как процесс распространения трещин в пористой горной породе с помощью фильтрующейся жидкости, то такая задача решена Ю. П. Желтовым [11]. Далее образование трещин рассматривается по Ю. П. Желтову.

При нагнетании под давлением жидкость, попадая в открытую трещин, полностью смачивает ее поверхность. Если считать, что трещина образуется симметрично относительно шпура, то в плане ее можно изобразить так, как показано на рис. 62. Жидкость проникает до конца трещин и фильтруется в пласт по всей ее поверхности. На прилегающий к трещине участок пласта действуют объемные силы, являющиеся градиентами давления фильтрующейся жидкости.

В механике сплошных сред наиболее общий способ учета действия объемных сил на среду состоит во введении в уравнения, описывающие процесс, дополнительных членов, характеризующих влияния этих сил на процесс. Поэтому в данном случае в систему дифференциальных уравнений Коши, описывающих движение элемента сплошной среды, были введены дополнительные члены, учитывающие силы фильтрации. Полученная система уравнений равновесия описывает деформацию пласта при фильтрации в нем жидкости. Введением полных напряжений (равных суммарным

напряжениям от горного давления и давления жидкости) была получена система уравнений равновесия без объемных сил. Для того чтобы система уравнений для компоненты напряжения была замкнутой, к уравнениям равновесия нужно присоединить условия совместности.

Таким образом была получена система из трех уравнений для определения трех функций: S_x , S_y и τ_{xy} , где S_x , S_y — полные напряжения по оси соответственно x и y ; τ_{xy} — касательные напряжения.

Рассматриваемая задача сводится к соответствующей плоской задаче теории упругости для полных напряжений:

$$S_x = \sigma_x - \Delta p, \quad S_y = \sigma_y - \Delta p, \\ \Delta p = p - p_{пл},$$

где σ_x , σ_y — напряжения по оси соответственно x и y ; Δp — перепад давления жидкости; p — давление жидкости; $p_{пл}$ — пластическое давление (давление газа).

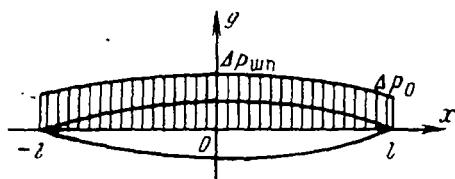


Рис. 62. Горизонтальный разрез вертикальной трещины, образующейся в массиве горной породы при нагнетании фильтрующейся жидкости

На участке $0 \leq |x| \leq |l|$ (рис. 62) жидкость движется из шпура по трещине, постепенно отфильтровываясь в пласт. При движении жидкости из-за гидравлического сопротивления происходит падение давления вдоль трещины, так что в шпуре давление равно $p_{шп}$, а в конце трещины

$p_0 < p_{шп}$. На контуре (пласта) давление жидкости равно $p_{пл}$. В направлении оси y пласт сжат горным давлением. Для удобства можно считать, что оно приложено к контуру трещины.

Таким образом, имеем следующие граничные условия при $0 \leq |x| \leq |l|$:

$$\sigma_y = \sigma_z; \quad S_y = \sigma_z - \Delta p; \quad \tau_{xy} = 0.$$

Для определения истинного распределения давления жидкости в трещине была получена формула

$$\Delta p = \Delta p_{шп} - 60\mu \int_0^x \frac{d\xi}{\omega^3(\xi)} + 24\mu \int_0^x \frac{1}{\omega^3(\xi)} \int_0^\xi v_y(\lambda) d\lambda d\xi, \quad (39)$$

где ξ — скорость деформации; ω — ширина трещины; v_y — скорость фильтрации в направлении y ; λ — упругая деформация.

Эта зависимость была аппроксимирована параболической зависимостью вида

$$\Delta p_0(x) = \Delta p_{шп}^0 - (\Delta p_{шп}^0 - \Delta p_0) x^2, \quad (40)$$

где

$$\Delta p_{\text{шп}}^{\circ} = p_{\text{шп}}^{\circ} - p_{\text{пл}}; \quad \Delta p_0 = p_0 - p_{\text{пл}};$$

$\Delta p_{\text{шп}}^{\circ}$ — падение давления в шпуре; P_0 — истинное давление в конце трещины.

Величина $\Delta p_{\text{шп}}^{\circ}$ определяется из следующего условия:

$$\int_0^l \Delta p(x) dx = \int_0^l \Delta p^{\circ}(x) dx. \quad (41)$$

Для определения истинного распределения давления требуется решить большое число условий такого вида, получить ширину трещины $\omega(x)$, подставив полученный параметр в условие и ре-

$$\frac{Q}{2} - 2 \int_0^x v_y dx = \frac{\omega^3(x)}{12k} v_x \quad (42)$$

шить задачу теории фильтрации при этом условии.

Такая задача была решена Ю. П. Желтовым. Однако этот метод слишком сложен для практического использования. Поэтому Ю. П. Желтов предложил упрощенную схему расчета. Давление в забое скважины в процессе разрыва не вычисляется, а принимается по опытным данным. Далее используются точные решения задач теории упругости и теории фильтрации, причем параболическое распределение давления в трещине заменяется постоянным средним перепадом давления

$$\frac{\Delta p_{\text{шп}} - \Delta p_0}{2} = q_{\infty}, \quad (43)$$

где q_{∞} — боковое горное давление (в нашем случае σ_3).

В результате этих решений были получены формулы для определения ширины и длины трещины.

Максимальная ширина трещины

$$\omega_0 = \frac{4(1-2\nu)(1+\nu)(\Delta p_{\text{шп}} - \sigma_3)}{3E} \sqrt{\frac{V_{\text{ж}} Q \mu}{2\pi^2 h^2 m k' \sigma_3}}; \quad (44)$$

длина трещины

$$l = \sqrt{\frac{V_{\text{ж}} Q \mu}{2\pi^2 h^2 m k' \sigma_3}}, \quad (45)$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; $V_{\text{ж}}$ — объем профильтровавшейся в пласт жидкости; Q — полный расход жидкости в двухстороннюю трещину; h — мощность пласта; m — пористость; k' — проницаемость; σ_3 — боковое горное давление.

В этих формулах неизвестной величиной является $V_{\text{ж}}$, которую можно определить по формуле

$$V = \pi t a b h, \quad (46)$$

где a и b — полуоси эллипса, описывающего контур области, занятой профильтровавшейся в пласт жидкостью:

по оси x

$$a = \frac{1}{2} \left(p_{пл} + \frac{1}{\rho_{пл}} \right);$$

по оси y

$$b = \frac{1}{2} \left(p_{пл} - \frac{1}{\rho_{пл}} \right), \quad (47)$$

где $p_{пл}$ — пластовое давление жидкости (газа).

Таким образом, зная величину пластового давления (газа), по формулам (44) и (45) можно определить ширину и длину образующейся вертикальной трещины.

С достаточной для практических целей точностью разрушающее давление можно определить, зная характер распределения и величину напряжений вокруг трещины при нагнетании.

Вода, попавшая в раскрытую трещину, давит во все стороны с одинаковой силой, соответствующей давлению нагнетаемой воды p_n . Под воздействием этого давления в прилегающих структурных блоках возникают напряжения. Эти напряжения в различных сечениях неодинаковы как по виду, так и по величине. В сечении по оси трещины действуют нормальные и касательные напряжения, которые вызывают деформации растяжения и сдвига. В сечениях, близрасположенных от трещины, действуют преимущественно нормальные напряжения, вызывающие деформации сжатия. В конце острой трещины напряжения концентрируются. Характер распределения напряжений и их величины в этих местах установлены методами теории упругости лишь для весьма небольшого числа факторов (выточка, отверстие и некоторые другие) вследствие большой сложности решения подобных задач. Для большинства факторов характер распределения напряжений и их величина установлены экспериментально, методом фотоупругости. Для концентратора типа острых трещин коэффициент концентрации напряжений k можно принять равным 3.

Тогда условие раскрытия трещины можно выразить следующим образом: давление нагнетаемой жидкости должно создать напряжения, достаточные для преодоления местного горного давления (наименьшей его составляющей) и предела прочности горной породы на разрыв, а также создать сжимающие напряжения, необходимые для минимального раскрытия трещины и проникновения в нее жидкости (с учетом концентрации напряжений в конце трещины):

$$P_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_p + \varepsilon E}{k}, \quad (48)$$

где σ_p — предел прочности горной породы на разрыв; ε — относительная деформация.

Значение σ_3 можно определить из выражения

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{\nu}{1-\nu} = \gamma H \left(1 + \frac{A}{b} \right) \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (49)$$

где γ — объемный вес вышележащих горных пород; H — глубина залегания пласта; A — ширина камеры; b — ширина междукамерного целика.

Подставляя выражение (49) в формулу (48), получим формулу для определения давления воды, необходимого для распределения трещин при нагнетании в трещиноватую горную породу при камерной системе разработки,

$$P_{н} = \gamma H \left(1 + \frac{A}{b} \right) \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{\sigma_p + \varepsilon E}{k}. \quad (50)$$

Карналлитовый пласт B характеризуется весьма сложной микротектоникой. В связи с этим число шпуров, необходимых для одного нагнетания в забое выработки, не может быть постоянным. График, построенный по экспериментальным данным (рис. 63), позволяет определить некоторые параметры нагнетания (радиусы влияния шпура, площадь ослабленной зоны, число шпуров на забой и расстояние между ними).

§ 4. Промышленные испытания метода нагнетания

Промышленные испытания метода нагнетания воды в пласт с целью предупреждения внезапных выбросов газа и карналлита проводились на Соликамском калийном

руднике. Работы проводились в выемочном штреке № 75 по выбороопасному шестому слою пласта B . Сначала штрек проводили узким забоем сечением $4 \times 2,5$ м с предварительным нагнетанием воды, затем его расширяли до проектного сечения карналлитовой камеры. Критерием оценки результатов испытаний был контур стенок выработок. При положительном результате — отсутствии выбросов при проведении и расширении штрека — он должен быть относительно прямолинейным; при отрицательном — криволинейным, аналогичным обычному контуру камер и выработок карналлитового пласта (см. рис. 27).

Для нагнетания применялась установка УНВ-2, серийно выпускаемая для угольных шахт, состоящая из насоса ГВ-351 произ-

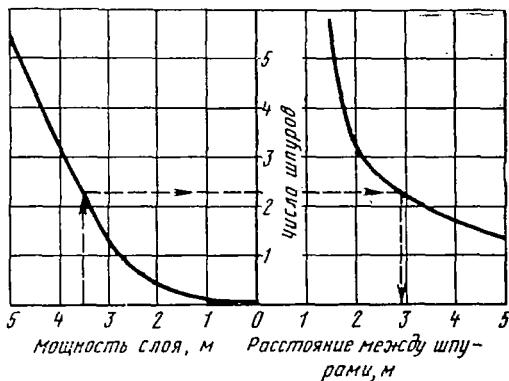


Рис. 63. График для определения некоторых параметров нагнетания в забое выработки по пласту B

водительностью до 30 л/мин и рабочим давлением до 200 кгс/см², высоконапорных труб и шлангов и герметизаторов шпуров. Длина нагнетательных шпуров была выбрана 5 м, исходя из необходимости обработки участка, прилегающего к взрываемому объему массива, из которого обычно происходят выбросы.

При высоте обнаженной стенки выработки 2,5 м зона действия шпура составляла 9 м², исходя из чего и в зависимости от микро-тектоники шестого слоя число нагнетательных шпуров принято 2—5. В процессе нагнетания осуществлялся постоянный контроль за содержанием горючих газов в рудничной атмосфере с помощью переносного индикатора газа «Рингроз», а также отбор проб воздуха на химический анализ до и после нагнетания. После проведения работ по нагнетанию проходческий цикл выполнялся в лось и число нагнетательных шпуров в забое.

Нагнетание производилось сразу в каждый пробуренный шпур и продолжалось до появления воды в забое, что соответствовало резкому спаду давления по манометру, установленному на насосе.

При повышении содержания газа в забое после нагнетания выше допустимого производилось проветривание с помощью вентилятора местного проветривания. После проветривания бурили следующий шпур и нагнетали в него воду. Местоположение и направление следующего шпура выбирали в зависимости от результатов предыдущего нагнетания (радиуса обработанной зоны) и местной тектоники шестого слоя. Так, если начинался подъем кровли (раздвиг шестого слоя), вместо одного шпура по мощности по оси забоя бурили два шпура. Этими же факторами определялось и число нагнетательных шпуров в забое.

При нагнетании происходило быстрое трещинообразование по различным направлениям. Трещины выходили не на забой, а в какие-либо шпуры на некоторой глубине от обнаженной поверхности массива. Визуально, а также по характеру штыба при бурении шпуров и самого процесса бурения в забое, обработанном нагнетанием, было отмечено изменение некоторых свойств карналлитовой породы: массив был немного увлажнен, а штыб, сухой и почти белый до нагнетания, был слегка влажным и имел более темную окраску. Это явление можно объяснить только высокой гигроскопичностью карналлита, т. е. высокой способностью его сорбировать влагу. В данном случае, очевидно, произошло поглощение влаги, оставшейся в трещинах от нагнетания. А этот процесс, как известно, приводит к понижению прочности материала.

Обработанные результаты нагнетания и анализов газовых проб приведены на рис. 64. Нагнетательные шпуры имели длину не более 5 м. Из-за разных неисправностей около 50% шпуров имели меньшую длину — 2—4 м. Давление воды при нагнетании по манометру изменялось от 20 до 80 кгс/см² и в среднем составляло 40—50 кгс/см², длительность нагнетания — от 2 до 100 с, радиус влияния нагнетательного шпура — от 0,7 до 8—10 м.

Зависимости радиуса зоны влияния нагнетательного шпура от длительности нагнетания (см. рис. 64) имеют приблизительно такой же вид, как и зависимости, построенные по данным экспериментов, проведенных на Первом Березниковском руднике. Это означает, что при нагнетании в забой штрека и в стенки камеры наблюдается одинаковая закономерность в характере образования трещин по различным направлениям по отношению к напластованию: в горизонтальном направлении (параллельном напластованию) они образуются в среднем со скоростью, в 2 раза превышающей скорость образования трещин в вертикальном направлении.

Наблюдения за газопроявлениями показали, что в пробах, отобранных в забое штрека перед нагнетанием, во всех случаях, за исключением двух, горючие газы не были обнаружены. В двух случаях был обнаружен водород в количестве соответственно 0,2 и 0,24%.

В пробах, отобранных в забое штрека после нагнетания, как правило, обнаруживался газ. Суммарное содержание водорода и метана изменялось от 0,1 до 78,9% (рис. 65). Одновременно с этим отмечалось повышение содержания углекислого газа от 0,1 до 1,8% и снижение содержания кислорода от 20,7 до 3,8%. Максимальная продолжительность газовыделения после нагнетания в один шпур, зафиксированная пробами, не превышала 1 ч.

Если оценивать эффективность дегазации карналлитового пласта шпурами различной длины (рис. 65), можно видеть, что при нагнетании в шпуры длиной 2; 2,5 и 3 м из 23 шпуров 11, т. е. только 50% оказали дренирующее действие. Максимальное содержание горючих газов в этом случае составило 21%. При нагнетании в шпуры длиной 5 м из 24 шпуров 21, т. е. 88% их были дренирующими, причем максимальное содержание газа было равно 79%. Меньший эффект дегазации более короткими шпурами можно объяснить лучшим дренированием этой зоны под действием взрывных работ. Поэтому для получения большего эффекта и надежности дегазации от нагнетания нужно применять шпуры длиной не менее 5 м.

Было пройдено 36 м штрека узким забоем (18 проходческих циклов). При этом не произошло ни одного случая внезапного выброса карналлита и газа, что подтверждается прямолинейностью стенок штрека по данным маркшейдерской съемки. После этого штрек расширили до 8 м — до проектной ширины карналли-

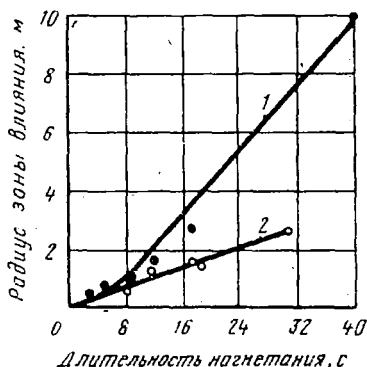


Рис. 64. Изменение радиуса зоны влияния шпура во времени при нагнетании в забое штрека:

1 — параллельно напластованию; 2 — перпендикулярно напластованию

товой камеры. Ни одного случая внезапного выброса карналлита также не произошло.

Результаты промышленных испытаний метода нагнетания с целью предупреждения внезапных выбросов карналлита и газа Соликамским калийным комбинатом были признаны положительными.

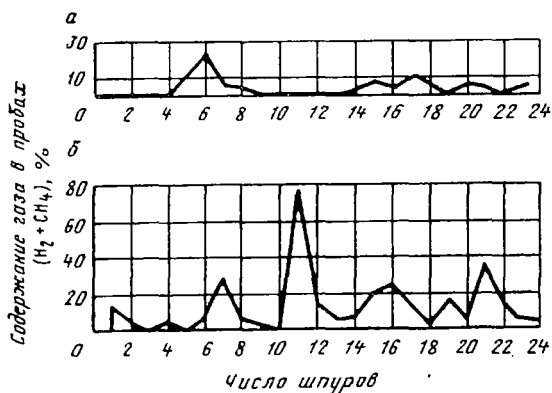


Рис. 65. Содержание горючих газов в пробах, отобранных после нагнетания в шпурь:
а — длиной 2—3 м; б — длиной 5 м

делах шестого слоя. Руду в камере вынимали на полное ее сечение 8×8 м с отставанием от забоя штрека на 10—30 м обычным почвоуступным забоем. Одновременно в аналогичных горно-геологических условиях обычным способом обрабатывалась соседняя с опытной камера 15.

Заметим, что блок 75 характеризовался сложными горно-геологическими условиями: каждый третий взрыв (проходческий цикл), или 35% общего числа взрываний, сопровождался выбросами карналлита и газа.

Всего с предварительным нагнетанием было отработано 85 м камеры. При этом проводились наблюдения за процессом трещинообразования, увлажнения массива и за газовыделениями. Сравнительные результаты отработки двух камер следующие: опытная камера отработана без нарушений целиков, тогда как на параллельном участке соседней камеры отмечено 6 крупных нарушений целиков. Вследствие последнего, самого крупного выброса (выбросом был пробит насквозь целик размером 19 м, выброшено около 1500 т карналлита) камера была закрыта.

Таким образом, промышленные испытания показали, что нагнетание воды в пласт карналлита — эффективный метод предупреждения внезапных выбросов газа и карналлита.

Промышленные испытания метода были продолжены при отработке карналлитовой камеры буровзрывным способом.

Опытная камера 17 блока 75 обрабатывалась с опережающим проведением по шестому слою разрезного штрека сечением $4 \times 2,5$ м по оси камеры. Нагнетание производилось из забоя штрека с целью обработки массива вокруг будущего контура камеры в пре-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге изложены современные достижения в области изучения газоносности, газопроявлений и борьбы с газами на калийных рудниках в СССР и за рубежом.

Разработанные методики определения газоносности и газовой выделений позволили создать методы расчета необходимого количества воздуха для проветривания подготовительных и очистных выработок для различных способов ведения горных работ. Современные схемы и средства вентиляции обеспечивают вынос и разбавление горючих газов, выделяющихся в выработки, а созданная в последние годы аппаратура обеспечивает надежный контроль за содержанием в атмосфере многокомпонентной горючей газовой смеси.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование и разработку новой аппаратуры, позволяющей прогнозировать не только внезапные выбросы, но и любые газодинамические явления (крупные суфлярные выделения, обрушения с попутным газовыделением и т. п.), а также на совершенствование средств и способов борьбы с опасными газодинамическими явлениями.

Решение этих сложных проблем позволит существенно повысить безопасность работы и усовершенствовать технологию разработки калийных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрович Х. М., Павлюченко М. М., Маркин А. Д. и др. Микровключенные газы и влага в природных калийных солях. — В сб.: «Калийные соли и методы их переработки». Минск, изд-во АН БССР, 1963, стр. 82—94.
2. Андреев А. Н. Разработка калийных месторождений. М., «Недра», 1966, 255 стр.
3. Вахрамеева В. А. Трещиноватость соляных пород карналлитовой зоны Верхнекамского месторождения. — В кн.: «Материалы по геологии и гидрогеологии районов соленакпления». Л., Госхимиздат, 1959. (Труды ВНИИГ, вып. XXXV), стр. 251—273.
4. Фактическое состояние и факторы устойчивости карналлитовых выработок Соликамского рудника. Научные труды ПермНИУИ, сб. IV. Пермь, Пермское кн. изд-во, 1962. Авт.: Водопьянов В. Л., Барковский В. М., Габдрахимов И. Х., Денисов М. И., стр. 87—100.
5. Водопьянов В. Л., Габдрахимов И. Х. Напряженное состояние карналлитовых целиков Соликамского рудника. Научные труды ПермНИУИ, сб. VI, Пермь, Пермское кн. изд-во, 1964, стр. 123—130.
6. Водопьянов В. Л., Уразова А. М. Механические свойства карналлита при сжатии. Научные труды ПермНИУИ, сб. V. Пермь, Пермское кн. изд-во, 1963, стр. 9—19.
7. Голубев Б. М. О пустотах в породах калийной зоны Верхнекамского месторождения, вскрытых горными выработками Березниковского калийного рудника. — В сб.: «Вопросы разработки месторождений калийных солей». Л., Отделение изд-ва «Недра», 1969, стр. 140—153.
8. Газовыделение при разработке калийных солей. Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС, вып. 4. М., Профиздат, 1963. Авт.: Дудырев А. Н., Дьяков В. В., Ковалев В. И., Корзон А. И., стр. 39—43.
9. Ефремов Г. Д. Гипотеза образования внезапных выбросов породы в выработках глубоких шахт. — «Уголь Украины», 1966, № 1, стр. 48—50.
10. Ефремов Г. Д. Причины образования внезапных выбросов породы в выработках глубоких шахт. — «Уголь Украины», 1967, № 2, стр. 41—43.
11. Желтов Ю. П. Деформации горных пород. М., «Недра», 1966, 198 стр.
12. Ксенофонтова А. И., Ушаков Н. З. Статистический метод установления коэффициентов неравномерности газовыделения в шахтах. — «Уголь Украины», 1966, № 1, стр. 43—45.
13. Кузнецов С. В. К вопросу о внезапных выбросах угля и газа. «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1966, № 4, стр. 14—18.
14. Медведев И. И., Сафронов А. В. Особенности газопроявлений на Соликамском калийном руднике. — В сб.: «Пути повышения производственной культуры, улучшения техники безопасности и охраны труда на химических предприятиях». Пермь, изд-во ЦБТИ, Западно-Уральского совнархоза, 1962, стр. 41—42.
15. Медведев И. И. Проветривание калийных рудников. М., «Недра», 1970, 207 стр.

16. Несмелова З. Н. О газах в калийных солях БКК. — В кн.: «Материалы по геологии и гидрогеологии районов соленаккумуляции». Л., Госхимиздат, 1959, стр. 106—243. (Труды ВНИИГ, вып. XXXV).
17. Николай В. И., Меликсетов С. С., Беркович И. М. Выбросы породы и газа. М., «Недра», 1967, 81 стр.
18. Полянина Г. Д. Выбор и исследование метода борьбы с газодинамическими явлениями на Верхнекамских калийных рудниках. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Кемерово, КузПИ, 1968, 24 стр.
19. Газодинамические явления на Верхнекамских калийных рудниках и возможность их предупреждения. — В сб.: «Исследования по горному делу». Пермь, изд. ППИ, 1968. Авт.: Полянина Г. Д., Водопьянов В. Л., Медведев И. И., Синопальников К. Г.
20. Савенко В. П. Об образовании свободного водорода в земной коре, обусловленном восстановительным действием продуктов радиоактивного превращения изотопов. — «Геохимия», 1958, № 1, стр. 14—21.
21. Степанович Г. Я., Николай В. И., Лысыков Б. А. Газодинамические явления при подготовке глубоких горизонтов. Донецк, «Донбасс», 1970, 109 стр.
22. Трофимов Н. А. Проветривание подготовительных выработок в условиях калийных рудников Верхнекамского месторождения. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Пермь, изд. ППИ, 1969, 20 стр.
23. Фивег М. П., Фомина В. Д. Газопроявления в выработках Первого Солигорского калийного рудника. — В сб.: «Вопросы разработки месторождений калийных солей». Л., Отделение изд-ва «Недра», 1969, стр. 126—134.
24. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М., Госгортехиздат, 1961, 363 стр.
25. Теоретические основы гидравлического разрыва нефтяных пластов. — В сб.: «V Международный нефтяной конгресс», т. 2. М., Гостоптехиздат, 1961, стр. 86—92. Авт.: Христианович С. А., Желтов Ю. П., Баренблатт Г. И., Максимович Г. К.
26. Христианович С. А. Исследования механизма гидравлического разрыва пласта. — В сб.: «Материалы по разработке нефтяных и газовых месторождений», т. II. М., Изд-во АН СССР, 1960, стр. 159—165.
27. Черепенников А. А., Боковская Т. К. Исследование газоносности третьего калийного горизонта Первого Солигорского рудника. — В сб.: «Вопросы разработки месторождений калийных солей». Л., Отделение изд-ва «Недра», 1969, стр. 135—139.
28. Шатов В. П. Исследование газопроявлений и газовый режим на Верхнекамских калийных рудниках. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Свердловск, изд. СГИ, 1966, 21 стр.
29. Duchrow G. CO₂—Austritt im Kalibergbau und die daraus resultierenden Aufgaben für die Grubenbewetterung. III Internationales Kali-Symposium 1965, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1967, s. 243—271.
30. Duchrow G. Planmäßige und technisch beherrschte Ausbruchprovokationen von Salz und Kohlensäure im Kalibergbauszweck Erhöhung der Betriebswirtschaftlichkeit. Bergakademie, 1964, N 3, S. 129 bis 138.
31. Eckart, Gimm, Thoma, Duchrow und Wolf. Plötzliche Ausbrüche von Gestein und Gas im Bergbau. Freiburger Forschungshefte, A 409, Leipzig, 1966, S. 335.
32. Elert K. Untersuchungen zum Auftreten von feindispers verteilten Kohlenwasserstoffgasen im Kaliflöz "Stassfurt". Bergakademie, 1969, No. 10, S. 584—589.
33. Cimm W. Kohlensäure und Kohlenwasserstoffgase im Kalibergbau der DDR und Methoden zur Bekämpfung der Gasgefahren. Bergbautechnik, 1954, No 11, No 12, S. 587—592, 656—662.
34. Junghans R. Der schwere CO₂—Ausbruch auf der Schachanlage Menzengraben der VEB Kaliwerk Heiligenrode am 7.7.1953 seine Ursache und Folgen. Bergakademie, No 9. S. 457—462, No 11, S. 579—589.
35. Kröger E. Das Gasauftreten in Südhartz-Kalibergbau. Bergbautechnik, 1952, Bd. 2, No 12, S. 561—563.

36. P f o r r H. Untersuchungen zur Gebirgsschlaggefährlichkeit von Gesteinen des Kalibergbaus. Freiburger Forschungshefte A-332, Leipzig, 1965, S. 895.
37. S c h r ä d e r, A c h e r m a n n, Grund: Entwicklung von Methoden zur Bestimmung des Gasgehaltes in Salzen. Bergakademie, 1960, No 10, S. 543—551.
38. S p a c k e l e r G. Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaus. Aufl. — Halle/Saale. VEB Knapp Verlag, 1957, S. 598.
39. S t o l l e E. Gasvorkommen in Kalibergwerken des Südharzgebietes. Bergbautechnik, 1953, Bd. 3, No 12, S. 561—563. 1954, Bd. 4, No 1, S. 46—52.
40. W i n t e r U. Untertagephysik im Kali- und Steinsalzbergbau zur Bekämpfung der Gas- und Laugengefahr. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1966, S. 156.
41. N e u e Erkenntnisse bei der Erforschung und Bekämpfung von Ausbrüchen im Bergbau. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1971, 111s.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Краткая характеристика основных калийных месторождений	5
§ 1. Горно-геологические условия разработки	5
§ 2. Системы разработки	10
§ 3. Физико-механические свойства и структура соляных пород	14
Глава II. Газоносность калийных залежей	20
§ 1. Генезис природных газов и формы нахождения газа в калийных залежах	20
§ 2. Методика исследования газоносности	24
§ 3. Газоносность соляных пород	35
Глава III. Газовыделения на калийных рудниках	41
§ 1. Виды газовыделений	41
§ 2. Методика исследования газовыделений	54
§ 3. Газовыделения при производственных процессах	59
§ 4. Газообильность рудников	68
§ 5. Мероприятия по борьбе с газами на рудниках	73
Глава IV. Внезапные выбросы соли и газа	81
§ 1. Характеристика выбросов	81
§ 2. Последствия внезапных выбросов	87
§ 3. Механизм выбросов	89
§ 4. Отличия внезапных выбросов солей от внезапных выбросов угля	99
Глава V. Мероприятия по борьбе с внезапными выбросами соли и газа	102
§ 1. Опыт борьбы с выбросами на Верхнекамских рудниках	102
§ 2. Зарубежный опыт борьбы с выбросами	104
§ 3. Прогнозирование внезапных выбросов	114
§ 4. Выбор мероприятий по предупреждению внезапных выбросов карналлита и газа	126
Глава VI. Испытания метода нагнетания жидкости в пласт с целью предупреждения внезапных выбросов	129
§ 1. Лабораторные исследования взаимодействия жидкостей с соляными горными породами	129
§ 2. Шахтные испытания	148
§ 3. Механизм понижения прочности соляного массива при нагнетании	152
§ 4. Промышленные испытания метода нагнетания	157
Заключение	161
Список литературы	162

Инокентий Инокентьевич Медведев
ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ

Редактор издательства *Т. Н. Мальцева*
Технический редактор *В. Л. Прозоровская*
Корректор *М. П. Курылева*

Сдано в набор 1/XI 1973 г. Подписано в печать 17/1 1974 г.
Т-03441 Формат 60×90/16. Бумага № 1 Печ. л. 10,5 Уч.-изд. л. 10,70
Тираж 2000 экз. Заказ № 1675/4918-10 Цена 57 коп.

Издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Московская типография № 32 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, К-51, Цветной бульвар, д. 26.

Уважаемый товарищ!

В издательстве «Недра» готовятся к печати
новые книги

ГАЗООБИЛЬНОСТЬ каменноугольных шахт. 15 л. 93 к. Авт.:
Ефремов К. А., Дубов Г. П., Дьячков А. И. и др.

В книге приведены данные по газовому балансу участков при различных системах разработки угольных пластов, применяемых в Кузбассе, и рассмотрены закономерности газовыделения с учетом влияния наиболее существенных природных и горнотехнических факторов. Дан прогноз газообильности нижних горизонтов действующих шахт и шахт-новостроек с обоснованием применяемых методов прогноза и их модификаций.

Детально рассмотрена область применения различных методов управления газовыделением в шахтах.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников угольных шахт, проектных институтов, геологической службы и других организаций угольной промышленности, а также на научных работников.

МЯСНИКОВ А. А., МАЩЕНКО И. Д., КРИКУНОВ Г. Н. Прогноз углекислотообильности угольных шахт. 15 л. 1 р. 63 к.

В книге даны теоретические основы проектирования и организации проветривания строящихся, реконструируемых и углубляемых угольных шахт с учетом углекислотообильности горных выработок при различных системах разработки и схемах проветривания в зависимости от основных горно-геологических и горнотехнических факторов. Приведены также практические рекомендации по организации проветривания. Рассмотрены закономерности образования углекислого газа при низкотемпературном окислении углей и выделения его в горные выработки, структура газового баланса, углекислотообильность участков и шахт. Приведены методика прогноза углекислотообильности горных выработок, рекомендации по определению необходимого для их проветривания количества воздуха и по выбору способов управления газовыделением.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных и производственных организаций, а также для работников научно-исследовательских и учебных институтов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ увлажнение угольных пластов. 12 л. 65 к.
Авт.: Гончаров В. А., Торский П. Н., Твардовский Е. Д. и др.

В книге рассмотрены фильтрационные свойства угольных пластов и зависимость их от различных факторов. Приведены схемы и параметры нагнетания воды в угольные пласты, методика определения этих параметров, увязка схем с технологией добычи угля. Подробно рассмотрены существующее оборудование, условия его применения, основные направления его совершенствования, техника бурения внутрипластовых скважин в различных горно-геологических условиях. Особое внимание уделено бурению скважин на выбросоопасных пластах. Рассмотрены перспективы применения новых методов повышения эффективности увлажнения угольных пластов (импульсное, импульсно-волновое нагнетание, воздействие ультразвука и др.).

Книга рассчитана на работников проектных и научно-исследовательских институтов, а также на инженерно-технических работников угольных шахт.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ взрывов угольной пыли в шахтах. 23 л. 1 р. 46 к. Авт.: Петрухин П. М., Нецепаев М. И., Качан В. Н. и др.

В книге рассмотрены основные факторы, определяющие опасность взрыва пыли в шахтах. Приведены теоретические основы распространения и отложения пыли, а также практические рекомендации по снижению интенсивности пылеотложения в горных выработках. Большое внимание уделено вопросам теории и практики предупреждения и локализации взрывов угольной пыли. В зависимости от фактической пылевзрывоопасности горных выработок, горнотехнических и климатических условий даны рекомендации по выбору рациональных способов защиты опасных по пыли шахт от взрывов пыли, приведены основные положения по контролю пылевого режима при различных способах и средствах борьбы со взрывами угольной пыли в шахтах.

Книга предназначена для широкого круга инженерно-технических работников угольной промышленности, научно-исследовательских и проектных организаций.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178. Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

№ 59 — 127412. Москва, И-412, Коровинское шоссе, 20.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

57 коп.

71896

Д4

30380

НЕДРА . 1974