

УДК 622.847

Б.А. Борзаковский, А.В. Шилов

ПРОЦЕССЫ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СОЛЕЙ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ РУДНИКА БКПРУ-1

Рассмотрен процесс растворения солей применительно к условиям рудника БКПРУ-1.

Ключевые слова: шахтное поле, затопление рудника, растворение солей, повреждение целиков.

Семинар № 26

17 октября 2006 г. на руднике Первого березниковского калийного рудоуправления (БКПРУ-1) произошел прорыв воды и началось его затопление. Шахтное поле размером 7500x7200 м располагается в пределах Березниковского куполовидного поднятия. На руднике отрабатывались три пласта: верхний пласт В карналлитового состава, нижние пласти АБ и КрII сильвинитового состава. Абсолютная отметка земной поверхности в районе стволов, расположенных примерно в центре шахтного поля, +120 м. Юго-Западная часть шахтного поля погружена до отметки по пласту КрII –265 м. Центральная часть шахтного поля поднята до отметки –50 м. Восточная и северная часть находятся на отметках –100 м –120 м.

Над отрабатываемыми пластами расположена свита карналлитовых пластов с пропластами каменной соли и покровная каменная соль. Общая мощность этих пластов 70–110 м.

Надсолевые породы водоносны, они включают соляно-мергелистую толщу (СМТ), терригенно-карbonатную толщу (ТКТ), пестроцветную толщу (ПЦТ) и четвертичные отложения. Пресные воды находятся в четвертичных отложениях, в ПЦТ и ТКТ. В

СМТ минерализация возрастает с 3 до 300 г/л.

Система разработки пластов камерная с оставлением междукамерных целиков. На момент затопления объем выработанного пространства составил 138,2 млн м³ (по пласту В – 16,9 млн м³, АБ – 11,1 млн м³, КрII – 110,2 млн м³). На руднике производились закладочные работы, поэтому объем пустот меньше на объем закладки в твердом теле (около 40 млн м³). Кроме этого, объем пустот меньше и на объем мульд, образовавшихся за период работы рудника (около 8 млн м³).

Всего объем пустот, которые будут затоплены, составляет около 84 млн м³.

При затоплении в рудник вначале поступают слабоминерализованные воды, а затем пресные. И те, и другие воды, контактируя с соляными породами, залегающими выше отрабатываемых пластов, приобретают начальную минерализацию. Далее этот раствор называем растворителем.

После затопления Третьего Березниковского рудника, произошедшего в 1986 г., М.П. Нестеровым и Б.П. Глуховым была разработана модель насыщения воды солями [1]. Согласно этой модели в месте про-

рыва воды образуется приемная камера, из которой происходит отток растворителя в шахтные выработки. По пути движения к заполняемым камерам растворитель продолжает насыщаться, достигая полного насыщения солями в камерах, растворяя целики.

Рассмотрим процесс растворения солей применительно к условиям рудника БКПРУ-1, где место прорыва расположено на склоне. Поэтому в первое время из приемной воронки растворитель движется под уклон и затапливает южную и западную часть шахтного поля расположенные ниже почвы пласта КрII в месте прорыва вод. В этот период поток растворителя движется по почве штреков и камер, производя выщелачивание почвы и стенок выработок. При выщелачивании увеличивается высота целиков и уменьшается их ширина, что приводит к снижению их несущей способности и разрушению. Наруженная соль растворяется быстрее. С поступлением в рудник определенного объема растворителя и разрушением целиков на земной поверхности образуется провал. На территории БКПРУ-1 провал образовался 28.07.2007 г. при отметке уровня затопления -165 м.

Оставшаяся часть шахтного поля расположена выше, поэтому направление движения растворителя меняется. На дальнейший путь растворителя оказало влияние то, что южная и западная часть шахтного поля уже затоплены, а с восточной стороны движение растворителя ограничено охранным целиком. В этой ситуации движение растворителя происходит вдоль охранного целика на север.

При достижении зеркалом растворителя кровли камер верхнего пласта (АБ) поток движется у кровли камер,

растворяя ее породы. Как и в случае движения потока по почве, высота целиков увеличивается, ширина уменьшается, соответственно целики разрушаются. При движении растворителя у кровли процесс расширения провала происходит быстрее, поскольку в кровле за слоем соли залегает пласт карналлита, разложение которого происходит быстрее, чем растворение соли.

По состоянию на 15 января 2008 г. размеры провальной воронки в плане на уровне земли составили 337x202 м, а на уровне коренных пород 305x170 м. Развитие провала относительно момента его образования происходит в предполагаемом направлении на север. Темп увеличения периметра воронки на уровне коренных пород 17—19 м на 1 млн м³ затопленного пространства.

Объем провальной воронки около 2,0—2,5 млн м³. Для размещения пород кровли с учетом разрыхления необходима емкость 2,8—3,5 млн м³. Масса соляных пород, которую необходимо растворить для создания такой емкости, определена с учетом коэффициента извлечения руды, степени закладки камер. Масса растворенных пород 5,3—6,6 млн т.

Поскольку на 15.01.2008 г. в рудник поступило 42 млн м³ воды, то содержание солей в ней при выходе из района провала составляет около 130—160 г/л. Дальнейшее насыщение растворителя происходит по пути движения и при заполнении камер. Руда, из которой сложены целики, включает несколько минералов, поэтому при растворении целиков получается рассол, содержащий несколько солей. Поскольку состав руды отличается от состава насыщенного раствора, то по глубине целика выщелачивание целиков получается нерав-

номерным. Процесс насыщения воды солями из целика можно характеризовать двумя величинами — объемом и глубиной повреждения целика.

Удельный объем растворения сильвинитовых целиков:

$$q_{p.c} = \frac{\beta_{hNaCl} - \beta_{ucNaCl}}{\rho_{NaCl}} + \frac{\beta_{hKCl} - \beta_{ucKCl}}{\rho_{KCl}},$$

$m^3/m^3 H_2O$

где β_{hNaCl} , β_{hKCl} — растворимость в 1 $m^3 H_2O$ солей соответственно $NaCl$ и KCl , т; β_{ucNaCl} , β_{ucKCl} — исходное содержание солей соответственно $NaCl$ и KCl в 1 $m^3 H_2O$, т; ρ_{NaCl} , ρ_{KCl} — плотность соответственно $NaCl$ — 2,16 т/ m^3 ; KCl — 2,0 т/ m^3 .

Если в камеру поступает пресная вода, то $\beta_{uc} = 0$, а $\rho_{hNaCl} = 0,304$ т/ m^3 , $\rho_{hKCl} = 0,148$ т/ m^3 , $q_h = 0,215$ m^3/m^3 .

При таком удельном объеме растворения с поступлением в рудник 84 млн m^3 воды общий объем выщелачивания солей составит около 18,0 млн m^3 .

При допущении однородного состава целика удельную глубину повреждения целика для каждого вида минерала можно определить по формуле:

$$l_{nob} = \frac{\beta_h - \beta_{uc}}{\alpha_p \cdot \rho_p}, m/m^3$$

где α_p — содержание минерала в руде, доли. ед; ρ_p — плотность минерала, т/ m^3 .

Удельная глубина повреждения целика по каменной соли в сильвинитовой камере при поступлении в неё пресной воды составит 0,193 m/m^3 ($\alpha_{NaCl} = 0,73$), а по сильвину 0,256 m/m^3 ($\alpha_{KCl} = 0,25$).

Средняя глубина повреждения целика с одной стороны пропорциональна половине ширины камеры:

$$l_{nob.u} = l_{nob} \cdot 0,5 \cdot b_k, m.$$

На руднике БКПРУ-1 ширина сильвинитовых камер колеблется от 10 до 16 м. В случае заполнения камеры пресной водой максимальная глубина повреждения целиков составит 1,48—2,4 м.

Так как по пути движения растворитель насыщается KCl , то реальная средняя глубина повреждения целиков сильвинитовых камер ожидается меньшей.

Растворение карналлитовых целиков сопровождается выделением из карналлита кристаллизационной влаги, которая в свою очередь насыщается $MgCl_2$. В результате этого процесса остаются несвязанные между собой соли $NaCl$ и KCl . Этот процесс называют разложением карналлитовых целиков. Так как карналлитовый пласт верхний, то в выработки этого пласта поступит не вода, а рассолы насыщенные $NaCl$ и KCl (далее сильвинитовый рассол), т.е. в карналлитовых камерах растворителем является сильвинитовый рассол.

Расчеты, выполненные для условий БКПРУ-1, показывают, что удельный объем разложения карналлита составит 1,28 m^3/m^3 , а удельная глубина повреждения 1,28 m/m^3 . При ширине карналлитовых камер 8 м максимальная средняя глубина повреждения целиков составит 5,1 м (56 % от начальной ширины целика).

Значения средней глубины повреждения целиков, указанные выше, не являются максимальными по следующим причинам.

Поскольку при контакте растворителя с целиком образуется насыщенный рассол большей плотности, то этот рассол оседает на почву камеры и препятствует дальнейшему растворению целика на толщине слоя насыщенного рассола.

Это означает, что нижняя часть целика повреждается незначительно,

а оставшийся растворитель будет разрушать в основном верхнюю часть целика. Процесс повреждения целика во времени можно описать двумя координатами по высоте и ширине (горизонтали).

По горизонтали он происходит пропорционально суточной скорости повреждения и определяется по формуле:

$$l_{n.c} = v_c \cdot i, \text{ м},$$

где $l_{n.c}$ — глубина повреждения по горизонтали, м; v_c — суточная скорость растворения, м/сутки; i — текущие сутки от начала контакта воды с целиком.

Вертикальная координата находится на уровне насыщенного рассола.

Толщина слоя насыщенного рассола, образующегося за сутки, по величине равна толщине слоя воды, расходуемой на его образование, и определяется удельным объемом растворения, скоростью растворения, шириной и толщиной слоя воды, контактирующего с целиком:

$$m_{n.c.p} = \frac{m_b \cdot w_c}{0,5 \cdot b_k \cdot q_e}, \text{ м},$$

где m_b — толщина слоя растворителя, контактирующего с целиком, м; w_c — суточная скорость растворения целика, м/сутки; b_k — ширина камеры, м.

Подставив значение

$$\frac{w_c}{0,5 \cdot b_k \cdot q_e} = q_{n.c}$$

как удельный расход растворителя на 1 м высоты целика, получим:

$$m_{n.c.p} = m_b \cdot q_{n.c}$$

В начальный период, когда идет заполнение камеры, слой растворителя, контактирующего с целиком, возрастает. В этот период суммарную толщину слоя насыщенного рассола, накопленного за i суток, можно определить по приближенной формуле:

$$\Sigma m_{n.c.p}^i = \frac{i+1}{2} \cdot i \cdot w_{n.b} \cdot q_{n.c} (1 - q_{n.c})$$

где $w_{n.b}$ — суточный подъем растворителя в камере, м.

Следует отметить, что формула действительна в области, когда суточная скорость подъема растворителя $w_{n.b}$ меньше суточного накопления насыщенного рассола.

После затопления камеры толщина слоя растворителя, контактирующего с целиком, уменьшается, соответственно суммарная толщина слоя насыщенного рассола за n суток после затопления камеры составит:

$$\Sigma m_{n.c}^n = h_k - \Sigma m_{n.c}^i - (h_k - \Sigma m_{n.c}^i) \cdot (1 - q_{n.c})^{n-1}$$

Суточную скорость повреждения целиков определили в лабораторных условиях в ходе двух разных экспериментов. Первый эксперимент проводили на модели камеры. Камера смоделирована в виде глухого цилиндрического отверстия в монолите руды. В модели сильвинитовой камеры в отверстие заливали пресную воду и воду с небольшим насыщением солями (10 % от максимального), а в модель карналлитовой камеры заливали рассол насыщенный NaCl и KCl. Через определенные промежутки времени определяли степень насыщения рассола и диаметр отверстия по верху. Как только рассол достигал насыщения, его выливали и определяли новые размеры и объем отверстия.

Во втором эксперименте образцы руды правильной формы помещали в воду или рассол такого же состава, что и в первом эксперименте. Через определенные промежутки времени измеряли размеры образцов.

В результате первого эксперимента установлено, что максимальная скорость повреждения стенок наблюдается в первые двое суток и составляет для сильвинитовой руды 8,5

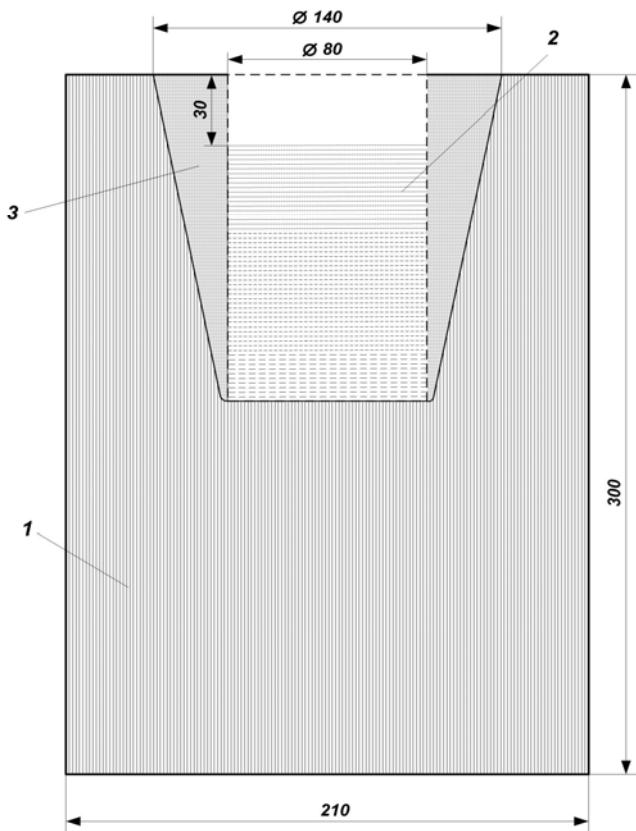


Рис. 1. Форма отверстия в монолите карналлита, образованная в результате выщелачивания: 1 — монолит карналлита; 2 — рассол; 3 — зона выщелачивания

условий: ширина камеры 12 м, высота камеры 6,5 м, ширина целика 10 м, закладка отсутствует, скорость выщелачивания 0,0085 м/сутки, исходное содержание KCl в воде 25 г/л, содержание KCl в насыщенном рассоле 125 г/л, скорость подъема рассола при заполнении камеры 0,3 м/сутки.

При этих условиях удельная глубина выщелачивания 0,2 м. Время затопления камеры 22 суток, время до сквозного повреждения целика 590 суток.

Следует отметить, что высота целика, на которой произойдет сквозное повреждение, меньше высоты камеры. Это означает, что рассол, слой которого находится выше, не будет насыщен солями. Его насыщение будет происходить за счет растворения оставшейся части целика при диффузии рассола.

На рис. 2, б показан профиль целика, когда камера заполнена солеотходами на 75 %. В заложенной камере часть целика, сообщающаяся с массивом закладки, подвергается меньшему выщелачиванию, поскольку объем рассола, контактирующего с целиком, меньше на объем твердых частиц закладки и равен объему пор в заложенном массиве, что от заложенного объема составит:

мм/сутки, карналлитовой 18 мм/сутки. После выщелачивания образца камера приобретает форму усеченного конуса. Дно не подвергается выщелачиванию. Этим подтверждается предположение, что насыщенный рассол, скапливаясь на дне, препятствует выщелачиванию. Форма отверстия в образце из карналлитовой руды после эксперимента показана на рис. 1.

Скорость выщелачивания образцов во втором эксперименте такая же, что и в первом.

На рис. 2 показаны теоретические профили целиков, построенные с учетом скоростей выщелачивания, установленных в ходе экспериментов.

На рис. 2, а показана форма сильвинитового целика для следующих

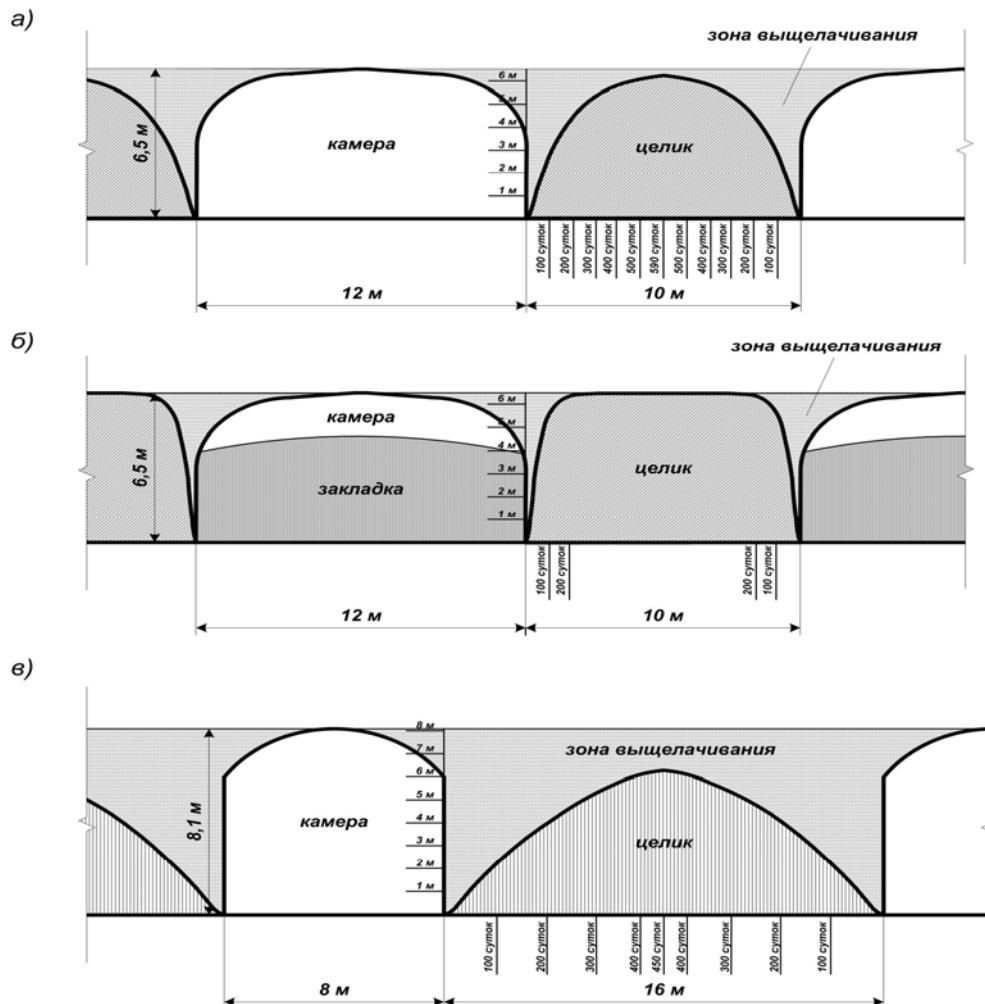


Рис. 2. Теоретические профили целика камеры, построенные с учетом скоростей выщелачивания: а — сильвинитовая камера; б — сильвинитовая камера с закладкой; в — карналлитовая камера

$$k_{nop} = 1 - \frac{\rho_3}{\rho_c} = 1 - \frac{1,5}{2,15} = 0,3$$

Время затопления заложенной камеры такое же, что и незаложенной, ибо оно зависит от высоты камеры. Время повреждения целика в заложенной части составит 50 суток.

На рис. 2, в показан профиль целика карналлитовой камеры шириной

8 м, высотой 8,1 м. Ширина целика 16 м. Скорость разложения целика 0,018 м/сутки, исходное содержание $MgCl_2$ 22,74 %, скорость подъема рассола 0,3 м/сутки, удельный объем разложения $1,28 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Данный теоретический профиль поврежденного (сильвинитовым раствором) целика карналлитовой камеры относится к случаю, когда камера не имеет гидравлической связи с сильви-

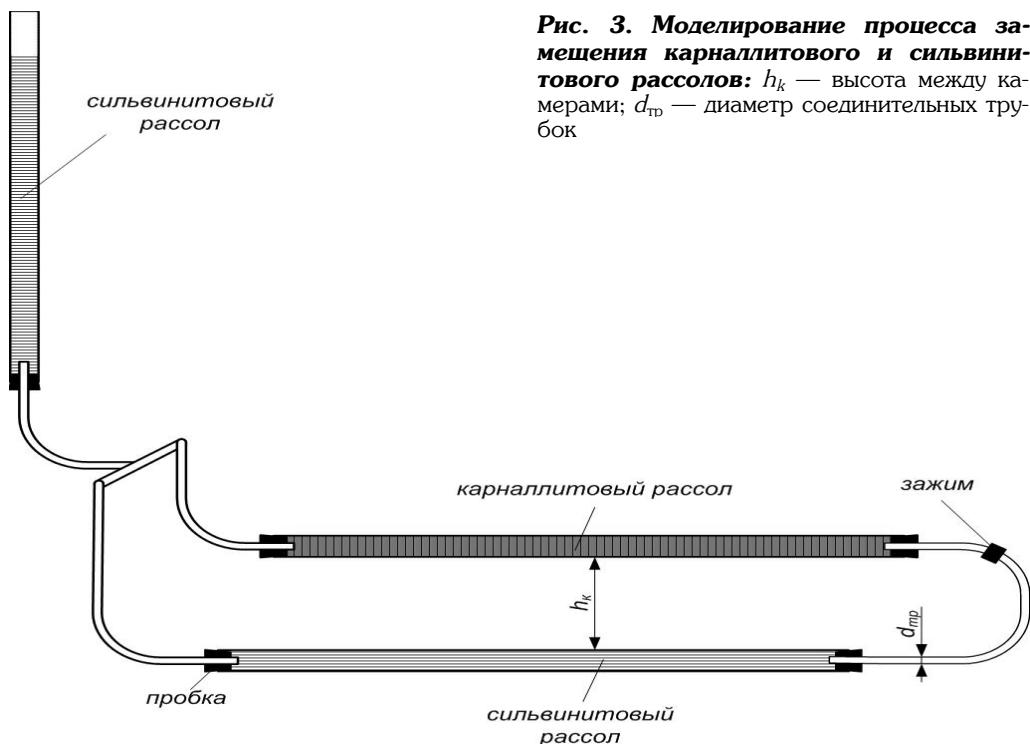


Рис. 3. Моделирование процесса замещения карналлитового и сильвинитового рассолов: h_k — высота между камерами; d_{tp} — диаметр соединительных трубок

нитовыми камерами. При наличии такой связи возможен обмен рассолов, поскольку карналлитовый рассол имеет большую плотность и карналлитовая камера располагается выше сильвинитовой [1].

Были проведены лабораторные эксперименты для изучения процесса замещения рассолов. На рис. 3 показана модель, которая состоит из стеклянных трубок, имитирующих камеры, и резиновых трубок, соединяющих камеры. Чтобы наблюдать за процессом, рассол, находящийся в карналлитовой камере, подкрашен. Во время экспериментов изменялось относительное положение камер по высоте (от 3 до 15 см) и диаметр соединительных трубок.

В результате экспериментов установлено следующее. Процесс замещения происходит даже при незначительном перепаде высоты (3 см). Время на-

чала замещения рассола зависит от диаметра соединительных трубок, чем больше их диаметр, тем меньше время. Время выравнивания плотностей рассола в камерах около 7—8 дней.

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что процессы разложения карналлитовых целиков и замещения карналлитовых и сильвинитовых рассолов протекают с небольшим разрывом по времени, необходимым для накопления карналлитового рассола до уровня почвы выемочного или вентиляционного штреков.

Замещение рассолов приводит к увеличению объемов сильвинитового рассола, контактирующего с карналлитовыми целиками, а последнее к увеличению повреждения карналлитовых целиков. Например, замещение рассолов в камерах без закладки приведет к полному разложению карналлитовых целиков, поскольку объемы

карналлитовой и сильвинитовой камер примерно одинаковы, а глубина повреждения карналлитового целика рассолами, находящимися только в этой камере, как указано выше, превышает половину целика.

Разложение карналлитовых целиков приведет к обрушению вышележащего карналлитового пласта и последующему его разложению за счет замещения рассолов.

Что касается разложения карналлита вдоль границы его отработки, то этот процесс будет протекать медленно (6—8 м в год) и продолжаться длительный период (несколько десятков лет), так как объемы сильвинитовых рассолов в руднике в 5 раз больше объемов карналлитовых камер.

Выводы

1. Ожидаемый объем растворения соляных пород при затоплении рудника БКПРУ-1 составит около 18 млн м³.

2. В районе провальной воронки происходит интенсивное растворение

соляных пород, степень насыщения солями составляет около 30 % от максимального насыщения.

3. При всех прочих равных условиях глубина повреждения целиков зависит от ширины камеры, соответственно при ширине камеры 16 м глубина повреждения сильвинитового целика составит 1,5 м с каждой стороны.

4. Глубина повреждения карналлитовых целиков зависит от наличия гидравлической связи между карналлитовой и сильвинитовой камерами. При отсутствии этой связи средняя глубина повреждения карналлитового целика составит 5,1 м, при наличии такой связи целик повреждается полностью.

5. Глубина повреждения целика неодинакова по его высоте. Нижняя часть целика повреждается незначительно, верхняя больше. Крайняя повреждаемости имеет степенной вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оценка возможных последствий оставления пустот, образованных на Первом березниковском руднике за пределами го-*

рода, непогашенными: отчет о НИР/УФ ВНИИГ; рук. В.Е. Мараков. — Пермь; Березники, 1991. ГЛАБ

Коротко об авторах

Борзаковский Б.А. — кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией технологии закладочных работ, складирования и захоронения отходов, ОАО «Уральский научно-исследовательский и проектный институт галургии» (ОАО «Галургия»), г. Пермь.

Шилов А.В. — инженер научно-исследовательской лаборатории технологии закладочных работ, складирования и захоронения отходов, ОАО «Уральский научно-исследовательский и проектный институт галургии» (ОАО «Галургия»), г. Пермь.
e-mail: mail@gallurgy.ru

