

УДК 622.84:622.363.2

ШАХТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВОДОЗАЩИТНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК



К. В. МОРОЗОВ¹,
зав. лабораторией,
канд. техн. наук,
morozov_kv@pers.spmi.ru



Д. Н. ДЕМ'КИН¹,
старший научный сотрудник



С. Н. КОТЛОВ¹,
старший научный сотрудник,
канд. геол.-минерал. наук



В. И. АБАШИН²,
заместитель главного геолога

¹ Научный центр геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
² ЕвроХим-ВолгаКалий, Котельниково, Россия

Введение

Отработка месторождений калийных солей осложняется возможностью возникновения внезапных прорывов воды в горные выработки [1–6]. Несмотря на многочисленные научные исследования и применяемые меры при строительстве и эксплуатации месторождений [7–9], зафиксировано множество случаев аварийного затопления соляных рудников и шахт [10–18]. В литературе описаны аварийные затопления рудников БКРУ-3 и БКРУ-1 ОАО «Уралкалий» в 1986 и 2006 гг., более 15 рудников в Германии («Иессенитц», «Фридрих-Франц» и др.), Канаде (Unity, Yarbo, Allan, Gerald, Vanscoy, рудник K2 компании Mosaik) [17, 19] и др.

В существующих нормативных документах основным способом предотвращения затопления выработок рассматривают создание гидроизоляционных перемычек, возводимых, в том числе, и в предохранительных целиках. О необходимости комплексного подхода к прогнозу устойчивости целиков

Обобщены результаты численного моделирования и натурных экспериментов по определению фильтрационных свойств породного массива на глубинных участках месторождения калийных солей. Исследования проведены с целью определения места размещения гидроизоляционных перемычек.

Ключевые слова: фильтрация, гидроизоляционные целики, водозащитные перемычки, методика, шахтные исследования, численное моделирование

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04

различного назначения подчеркнута в работе [20]. Однако те же нормативные документы запрещают проведение опытно-фильтрационных работ в границах предохранительных целиков. Поэтому проведение шахтных экспериментальных исследований фильтрационных свойств и выбор параметров перемычек можно осуществить только на участках, идентичных по геологическому строению участку в предохранительном целике.

Оценку коэффициента фильтрации k выполняют как в лабораторных, так и в натуральных условиях [21–33]. Разнообразие методик лабораторных исследований позволяет оценить влияние широкого перечня факторов, характерных для условий горного производства, на показатели проницаемости. Так, в работе [21] оценивали чувствительность проницаемости массива к изменению напряженного состояния осадочной толщи пород с помощью исследования образцов в установке трехмерного сжатия. Похожие исследования были проведены авторами работы [22] на образцах песчаника различного строения и состава. Полученные зависимости проницаемости и эффективного напряжения предлагается использовать при оценке сохранности пород-коллекторов.

Авторами работы [23] при испытании образцов керна известняковых пород получены закономерности, позволяющие связать коэффициент проницаемости с индексом качества пород RQD. Использование этого показателя, широко распространенного в практике геомеханического сопровождения горных работ, может существенно уменьшить трудозатраты на оценку фильтрационных свойств массива.

На связь между электрическими параметрами пород и их относительной проницаемостью указывают авторы работы [24]. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил авторам оценивать поровую структуру пород, а следовательно, их фильтрационные свойства.

О рисках влияния активных разломов на возможные динамические проявления горного давления указывается в работах [25, 26]. Данное явление необходимо учитывать при оценке проницаемости массивов в зоне влияния тектонических нарушений и при расположении выработок в динамически активных зонах.

Интересные исследования проницаемости пород проводятся, например, при оценке поровой структуры и трещиноватости геотермальных [27], нефтегазовых [28] коллекторов и каменноугольных массивов [29]. В работе [27] показано, что проницаемость массива горных пород повышается нелинейно с увеличением пористости и уменьшается с увеличением эффективного давления за счет закрытия микротрещин. К подобным выводам приходят и авторы работы [28] на основании комплексных исследований (анализа публикаций, лабораторных испытаний, численного моделирования и результатов полевых испытаний скважин) на примерах нефтяных месторождений севера Пермского края.

Лабораторные исследования, позволяющие получить значение коэффициента фильтрации k в образце, дают возможность детально исследовать физическую картину проницаемости горных пород, однако наиболее представительные результаты определения коэффициента фильтрации можно получить благодаря комплексу исследований в массиве, максимально схожим по геологическому строению с проектным местом введения гидроизоляционной перемычки.

Большинство существующих методик оценки проницаемости массива основаны на проведении откачек (наливов) и используются при ведении открытых горных работ. Методики для подземных условий весьма ограничены, что вызывает необходимость их адаптации для глубин порядка 1000 м, на которых планируется отработка наиболее перспективных калийных месторождений.

Методика проведения шахтных экспериментальных исследований

Предварительные положения. Для предварительной оценки условий поведения массива горных пород в районе проектируемых гидроизоляционных перемычек и планирования полевых экспериментов, направленных на определение проницаемости горных пород в районе предохранительного целика, была разработана численная геофильтрационная модель. Модель реализована в интегрированной среде для трехмерного моделирования движения подземных вод Visual MODFLOW.

Размеры модели соответствует участку массива горных пород с размерами в плане 50×50 м, мощностью 30 м; объем моделируемой области равен 75 тыс. м³. Нижняя граница модели проведена по отм. –970 м. На модели задавали участок штрека длиной 50 м и имитировали дренажное воздействие выработки сечением 4,4×3,9 м. Размеры модельных блоков изменяются от 0,1 до 0,4 м для обеспечения

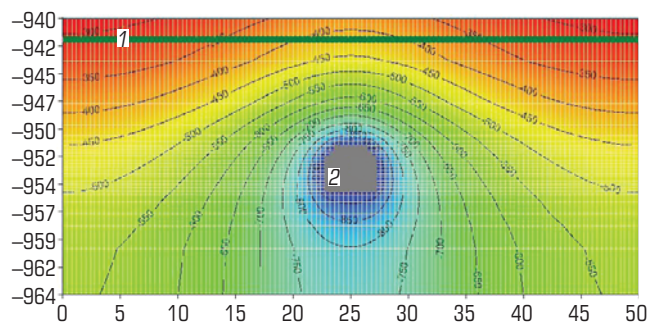


Рис. 1. Схематический разрез моделируемой области в крест простирания штрека с изолиниями напоров: 1 и 2 – гидродинамические границы с условием III рода на кровле модели и на контуре выработки соответственно

корректной имитации опытной скважины. Фильтрационные параметры моделируемой области задавали, исходя из представлений о малой проницаемости горных пород, вмещающих выработки. Коэффициент фильтрации по всей модели, за исключением блоков, имитирующих штрек, задан равным 10^{-6} м/сут, что характерно для вмещающих пород на месторождениях солей. В блоках модели, соответствующих выработочному пространству, задана существенно более высокая проницаемость – 1 м/сут.

Результаты выполненных расчетов, представленные на **рис. 1**, иллюстрируют распределение напоров подземных вод, которое в дальнейшем используют в качестве начальных условий при моделировании опытного нагнетания в скважину. При этом напор на верхней границе определяли, исходя из сведений, полученных по контрольно-стволовым скважинам.

На вышеописанной модели в условиях нормальной работы штрека имитировали нагнетание воды в скважину с постоянным давлением 800 м водяного столба. Для решения нестационарной фильтрационной задачи требуется учет емкостных свойств массива горных пород. Характерный порядок значений для коэффициента упругоэластичности, m^{-1} , осадочной толщи можно определить по формуле [34]: $\eta^* = 10^{-3}/z$, где z – глубина залегания горной породы, м.

Учитывая, что планируемые опыты будут выполнять на глубине около 1150 м, ожидаемая величина коэффициента упругоэластичности составляет $8,7 \cdot 10^{-7} m^{-1}$. Данное значение задано для проведения моделирования при неустановившемся режиме фильтрации.

Продолжительность периода моделирования принята 3 сут, что существенно превышает ожидаемую длительность опытного нагнетания. На **рис. 2** представлен прогнозный график расхода нагнетания. Максимальный расход нагнетания составляет $2 \cdot 10^{-3}$ л/мин, стабилизация расхода нагнетания происходит через 10–20 ч после начала опыта. Данные величины использованы как ориентир при планировании полевых работ.

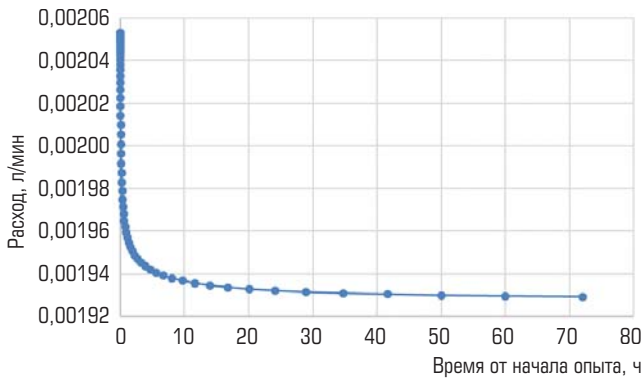


Рис. 2. График изменения расхода во время опытного нагнетания воды в скважину

Схематичный разрез по оси нагнетательной скважины с поверхностями равных градиентов напора представлен на **рис. 3**.

Анализ изменения поля градиентов во времени показал практически малую их изменчивость после 10 ч нагнетания, так как опыт согласно методике проводили с постоянным давлением. К концу опыта на расстоянии 0,3 м от опытной скважины сформируется зона с градиентом, в 5 раз превышающим величины, прогнозируемые при эксплуатации водонепроницаемой перемычки. Это обстоятельство позволяет считать принятое давление в 800 м водяного столба достаточным для получения представительных результатов полевых испытаний.

Общие положения. Шахтные экспериментальные исследования фильтрационных свойств горных пород в условиях больших глубин для создания гидроизоляционных перемычек включают следующие основные этапы.

1. Согласование с геологической службой рудника выбора места расположения экспериментальных участков и скважин. Критерии выбора:

- расположение участка на удалении не менее 15 м от места возведения предполагаемой перемычки;
- идентичность геологических условий относительно участков выработки, пройденной в границах предохранительного целика.

Число экспериментальных участков зависит от изменчивости геологических условий в границах предохранительного целика. На каждом участке испытания проводят в трех скважинах. Скважины располагают не ближе 50 м от границ предохранительного целика. Расстояние между первой и второй скважиной 20 м, второй и третьей – 30 м.

2. Бурение скважин с отбором кернового материала для лабораторных исследований. Скважины бурят в борт выработки. Отобранный керн передают на лабораторные исследования фильтрационных и физико-механических свойств. Глубина скважины 3 м. Диаметр скважины (91 мм) определяется техническими параметрами бурового и экспериментального

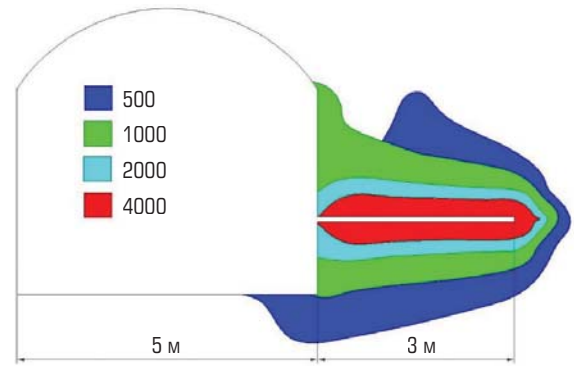


Рис. 3. Распределение градиентов напора по оси нагнетательной скважины

оборудования. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать большим диаметрам.

3. Проведение эндоскопических наблюдений стволов скважин с целью проверки качества их промывки, наличия остатков бурового шлама и раскрытых трещин. Монтаж анкеров безопасности для крепления пакера во избежание его выскальзывания. Сооружение гидравлической цепи нагнетания.

4. Проведение работ по нагнетанию насыщенного рассола и оценка степени проницаемости горных пород. Устанавливают возможность перетекания жидкости по соляным прослойкам и фильтрации в массиве горных пород, исключая их растворение.

5. На основании данных оценки геологических условий и анализа результатов шахтных (и лабораторных) исследований водопроницаемости пород устанавливают возможность переноса результатов шахтных исследований, проведенных вне зоны, на зону предохранительного целика.

В качестве косвенной характеристики проницаемости, определяемой по результатам нагнетаний как отношение расхода закачиваемого рассола к повышению напора и к длине опытного интервала ствола скважины, используют удельное водопоглощение [22].

Нагнетание должно быть проведено в интервалы переменной длины не менее трех на одну скважину. Для этих целей используют следующий порядок действий: после проходки скважины до проектной глубины выполняют поочередную установку пакера с шагом 0,5 м от устья к забою, в изолированный интервал и осуществляют нагнетание. Таким образом, интегрально опробуют всю скважину. Дифференциацию борта выработки по проницаемости будут осуществлять путем вычитания из последующих объединенных интервалов предыдущих.

Максимальное давление нагнетания должно соответствовать потенциальному давлению на перемычку. Как было показано выше, при создании давления во время опыта в 800 м водяного столба достигается пятикратное превышение градиентов напоров по сравнению с прогнозируемыми во время работы перемычки. Максимальное гидростатическое давление на

перемычку оценивается значением 8,2 МПа, исходя из естественного положения уровней подземных вод и их плотности.

Оборудование. Важнейшим аспектом создаваемой в Горном университете методики является подбор оборудования для шахтных исследований. В соответствии с ГОСТ 23278–2014 [35], рекомендуется следующий базовый состав используемого оборудования, главным звеном которого служит устройство для изоляции опытного интервала – пакер.

Пакер состоит из уплотнительного элемента и рукавов для раздувания пакера и подачи жидкости в опробуемый интервал. Диаметр пакера выбирают, исходя из диаметра опытной скважины. По способу уплотнения принципиально могут быть использованы два типа: с механическим и с гидравлическим приводами. Учитывая высокое давление, при котором проводят эксперимент, и малую глубину скважин, предпочтение следует отдать гидравлическому пакеру.

Пакер в скважину помещают на нагнетательных штангах, которые соединяют с насосом посредством рукава высокого давления. Длина гибкого рукава обусловлена расстоянием от скважины до насосной установки, которую следует располагать на безопасном расстоянии от устья скважины. Прочность нагнетательных штанг и рукавов должна соответствовать максимальному давлению, создаваемому в процессе проведения эксперимента.

Регулирование давления нагнетания осуществляют с использованием запорной арматуры и гидроклапана или редуктором давления, установленным на насосе, который обеспечивает постоянное давление нагнетания. Давление нагнетания измеряют на нагнетательной линии, для этого может быть использован электронный манометр с самописцем. Измерение расхода нагнетания также целесообразно автоматизировать, например с использованием электромагнитного расходомера, который выдерживает давление до 150 МПа.

Конечный состав оборудования, выбранный авторами для проведения шахтных исследований, приведен ниже.

Надувной пакер TPE 82	2
Манжета для пакера TPE 82	1
Комплект запасных уплотнительных колец для пакера TPE 82	1
Рукав высокого давления	2
Насос DESOI power ingest 303	1
Ручной поршневой насос DESOI M-Power TP-1	2

Подготовка и проведение испытаний. Подготовка и проведение испытаний основаны на требованиях ГОСТ 23278–2014 и включают в себя бурение, очистку от шлама опытного интервала, изоляцию интервала пакером, монтаж установки нагнетания рассола, пробное нагнетание в течение 15 мин с напором 10 м водяного столба для проверки работы системы.

При проведении испытания следует: поддерживать постоянный напор в течение всего испытания (ступени); вести замеры расхода через каждые 10 мин или чаще;

контролировать изоляцию опытного интервала путем визуального осмотра устья скважины; обеспечить ведение журнала.

Нагнетание осуществляют в пять ступеней. Первые четыре ступени характеризуются давлением 1/5, 2/5, 3/5 и 4/5 от максимального. На пятой ступени создают максимальное давление, соответствующее максимальному расчетному давлению на проектируемую водозащитную перемычку. Перерывы для перехода от одной ступени напора к другой должны быть сведены к минимуму.

Каждую ступень нагнетания необходимо осуществлять до стабилизации расхода в течение 1 ч. Ожидаемое время установления расхода нагнетания на каждой ступени – до 1 сут.

За расчетную величину расхода следует принимать средний расход при стабилизации фильтрационного режима.

В процессе испытаний строят графики изменения расхода и напора во времени.

Интерпретация результатов полевых работ. Расчет коэффициента фильтрации при пакерных опробованиях можно выполнять по уравнению Тима [36] или Мойе [37]:

$$k = \frac{Qpg}{2\pi l_n \Delta P} \left(1 + l_n \frac{l_n}{2R_{\text{в}}} \right);$$

$$k = \frac{Qpg}{2\pi l_n \Delta P} l_n \frac{R}{R_{\text{в}}}; \Delta h = \frac{\Delta P}{pg},$$

где k – коэффициент фильтрации, м/сут; Q – расход нагнетания, м³/сут; p – плотность нагнетаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; l_n – длина интервала нагнетания, м; ΔP – изменение давления на скважине, Па; $R_{\text{в}}$ – радиус интервала нагнетания, м; R – радиус влияния, м.

Кроме того, обработка результатов пакерного опробования может быть проведена с использованием программы ANSDIMAT.

Результаты

Для проведения шахтных экспериментальных исследований водопроницаемости горных пород были выбраны участки, расположенные на абсолютной отметке 950–970 м. Породы на участках исследований представлены ангидритами, доломитами, ангидрит-доломитовой породой с включениями каменной соли.

При обработке данных, полученных по результатам испытаний скважин, проводили интерпретацию по двум методам (классический и метод подбора параметров) для взаимной проверки результатов каждого из них. Стоит отметить, что объем жидкости, который тратили на поддержание напора в течение всего опыта для скважин, не превышал 80 мл (в среднем 50–60 мл). Целесообразно использовать расход, соответствующий этому значению как максимальному, полученному в ходе экспериментов.

Согласно классической методике, интерпретация результатов нагнетаний воды в скважину сводится к определению

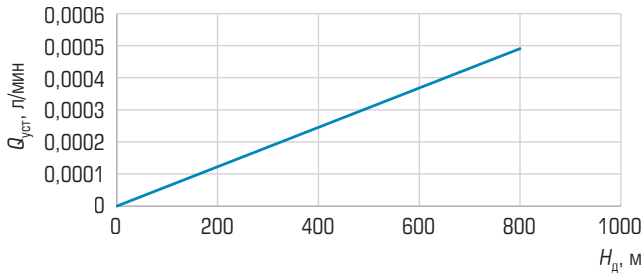


Рис. 4. График зависимости установившегося расхода от действующего напора

численного значения величины удельного водопоглощения q и расчету коэффициента фильтрации k .

Пример расчета удельного водопоглощения и коэффициента фильтрации показан на примере скважины Т-85.

В первую очередь строят график зависимости установившегося расхода от действующего напора $Q_{уст} = f(H_д)$ (рис. 4).

Далее определяют удельное водопоглощение по любой точке на графике зависимости установившегося расхода от действующего давления по формуле

$$q = Q_{уст} / (H_д / l_0),$$

где $Q_{уст}$ – установившийся расход, л/мин; $H_д$ – действующее давление в эквивалентных давлению пресной воды, м вод. ст., рассчитывают, исходя из условия 1 бар = 10,197 м вод. ст.; l_0 – длина интервала нагнетания (2,05 м).

$$q = 0,000491 / (815,76 \cdot 2,05) \approx 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ л/(мин} \cdot \text{м)}.$$

Эмпирическая формула В. Д. Бабушкина позволяет рассчитать коэффициент фильтрации пород, исходя из количественных значений удельного водопоглощения при опытном нагнетании и геометрии скважины:

$$k = 0,525 q \lg(0,66 l_0 / r_c),$$

где r_c – радиус скважины (0,0455 м).

$$k = 0,525 \cdot 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot \lg(0,66 \cdot 2,05 / 0,0455) \approx 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м/сут}.$$

Аналогичным образом рассчитанные количественные значения удельного водопоглощения и коэффициента фильтрации для всех остальных скважин приведены в табл. 1.

Согласно методу подбора параметров, для интерпретации характера релаксации давления рассола в скважине, созданного в ходе начального периода нагнетания (до 80 бар), использовано специальное программное обеспечение Ansdimat. Изменения давления в скважинах рассматривают с позиций его восстановления к исходным значениям (атмосферным), по аналогии с восстановлением уровня при откачках после прекращения водоотбора. Расчеты выполнены, исходя из предпосылки отсутствия влияния границ опробуемого участка на фильтрационные процессы, что соответствует схеме Ч. Тейса.

Таблица 1. Количественные значения удельного водопоглощения и коэффициента фильтрации пород опытных скважин

Скважина	$q \cdot 10^{-7}$, л/мин	$k \cdot 10^{-7}$, м/сут
Т-85	2,9	2,4
Т-84	3,6	2,9
Т-83	8,9	7,1
Т-82	2,9	2,3
Т-81	6,5	5,2
Т-80	3,4	2,7
Т-79	4,9	3,9
Т-74	2,3	1,87
Т-73	4,7	3,8
Т-72	5	4

Табл. 2. Значения фильтрационных параметров пород, полученные методом подбора параметров

Скважина	Проводимость пласта $T \cdot 10^{-7}$, м ² /сут	$k \cdot 10^{-7}$, м/сут
Т-84	4	2
Т-83	1,3	0,65
Т-81	3	1,5
Т-80	6	3
Т-79	3,2	1,6

Значения коэффициентов фильтрации пород, полученные по результатам интерпретации методом подбора параметров в программе Ansdimat, приведены в табл. 2. Полученные величины имеют один порядок с результатами лабораторного определения коэффициента фильтрации на образцах.

Обсуждение результатов

В результате проведения шахтных исследований проницаемости горных пород были получены опытные данные. Интерпретация и обработка данных по двум методикам иллюстрируют схожесть полученных результатов, что повышает достоверность исследований и указывает на корректность выбранных методов и расчетных схем, а также на соответствие результатов теоретическим предпосылкам теории фильтрации подземных вод.

Исходя из требований действующих отраслевых нормативных документов, критерием, удовлетворяющим гидроизоляционной функции переемычки, является соблюдение значений коэффициента фильтрации горных пород в районе ее возведения менее $3,5 \cdot 10^{-5}$ м/сут.

Как следует из сводных таблиц значений коэффициентов фильтрации, определенных по результатам полевых

исследований, требуемые значения превышают полученные в натуральных условиях в среднем в 100 раз.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что коэффициенты фильтрации в породах, слагающих предохранительный целик, существенно ниже требуемых нормативной документацией. Следовательно, они способны выполнять гидроизоляционную функцию при сооружении противофильтрационных перемычек.

Заключение

Обязательным элементом конструктивных способов защиты рудников от затопления при их строительстве и отработке калийных месторождений является возведение гидроизоляционных перемычек. Перемычки возводят при угрозе прорыва воды в горные выработки. Параметры перемычек рассчитывают по технологическим, геомеханическим и гидрогеологическим факторам, среди которых важнейшее значение имеет коэффициент фильтрации. Для его определения специалистами Санкт-Петербургского горного университета была разработана соответствующая методика и проведен комплекс

натурных экспериментов в выработках, расположенных на глубинах около 1000 м. Геологическое строение и большая глубина расположения выработок обуславливают высокие значения гидростатического давления.

Обработка данных экспериментальных исследований показала, что значения k в породах, слагающих предохранительный целик, на два порядка ниже установленных предельных значений. Подобные результаты свидетельствуют о возможности возведения гидроизоляционных перемычек в границах охранного целика.

Разработанная авторами методика может быть использована специалистами научных и производственных предприятий для корректного выбора мест возведения и определения параметров гидроизоляционных перемычек для защиты рудников от затопления.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNII ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 25–31
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04

In-situ permeability testing of deep-level potash salt rocks with a view to creating water retaining walls

Information about authors

K. V. Morozov¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, morozov_kv@pers.spmi.ru

D. N. Demekhin¹, Senior Researcher

S. N. Kotlov¹, Senior Researcher, Candidate of Geologo-mineralogical Sciences

V. I. Abashin², Deputy Chief Geologist

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²Eurochem VolgaKaliy, Kotelnikovo, Russia

Abstract

Potash mining is usually implemented under water bodies both on ground surface and underground. Potentiality of hydraulic connection to form between these bodies and mine roadways because of natural (jointing) or induced (aquifer undermining) reasons can cause flooding of some roadways or total closure of mines.

An obligatory flooding protection structure in potash mine construction and mining is a waterproof wall. Such walls are constructed in case of hazards of water intrusions in mines. Designs of the water retaining walls take into account the engineering, geomechanical and hydrogeological factors, including the critical factor of permeability.

Aimed at evaluation of permeability, the Saint-Petersburg Mining University developed an appropriate procedure and accomplished in-situ experimental activities in roadways on some mine of EuroChem Group AG, at a depth of 1000 m below ground surface. The geological structure and great depth of occurrence of the test roadways govern a high hydrostatic pressure.

The in-situ test data processing shows that the permeability of rocks composing a safety pillar is 2 orders of magnitude lower than the preset threshold. The results imply feasibility of construction of water-retaining walls within the limits of the safety pillar.

The authorial procedure can be used by research and production agencies when selecting correct construction sites and parameters of waterproof walls aimed at mine flooding protection.

Keywords: permeability, waterproof pillars, water-retaining walls, procedure, in-situ testing, numerical modeling.

References

- Zubov V. P., Kovalski E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing Verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 22–33.
- Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London: Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1. pp. 3–16.
- Boltyrov V. B., Vatagina V. E. Dangerous induced and natural processes on Verkhnekamsk potassium–magnesium salts (Perm Region). *Emergency Protection of People and Areas: II International Conference Proceedings*. Ekaterinburg: Uralskiy gosudarstvennyi gorniy universitet, 2016. pp. 67–72.
- Zubov V. P., Smychnik A. D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015. Vol. 215. pp. 29–37.
- Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan potash mining—What can be learned from them? *CIM Bulletin*. 1991. Vol. 84, No. 945. pp. 58–66.
- Danileva N. A., Danilev S. M., Bolshakova N. V. Allocation of a deep-lying brine aquifer in the rocks of a chemogenic section based on the data of geophysical well logging and 2D seismic exploration. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 501–511.
- Baryakh A. A., Gubanova E. A. On flood protection measures for potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 613–620.
- Kovalski E. R., Gromtsev K. V., Petrov D. N. Modeling deformation of rib pillars during backfill. *GIAB*. 2020. No. 9. pp. 87–101.
- Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 33–46.
- Shiman M. I. Avoiding of flooding of potassium mines. Moscow: Nedra, 1992. 160 p.
- Baryakh A. A., Krasnoshteyn A. E., Sanfirov I. A. Geotechnical accidents: Flooding of Berezniki Potash Mine 1. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2009. No. 2. pp. 40–49.
- Rauche H. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. Berlin: Springer Vieweg, 2015. 580 p.
- Laptev B. V. Accidents at Upper Kama potash–magnesium salt deposit. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2009. No. 8. pp. 28–31.

14. Andreichuk V., Erasó A., Domínguez M. C. A large sinkhole in the Verkhnekamsky potash basin in the Urals. *Mine Water and the Environment*. 2000. Vol. 19, Iss. 1. pp. 2–18.
15. Laptév B. V. Historiography of accidents in salt rock mining. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2011. No. 12. pp. 41–46.
16. Pachgin V. V. Justification of intense flat potash–magnesium seam mining under aquifers. *Topical Issues of Subsoil Usage: Proceedings of International Forum–Contest of Young Scientists*. Saint-Petersburg, 2015. Vol. 1. pp. 82–83.
17. Kvitkin S. Yu., Trofimov V. I., Kovalskaya V. Environmental efficiency and legal possibility of mineralized water dispose in the suprasalt sequence of the Verkhnekamskoe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 228. pp. 731–737.
18. Baryakh A. A., Andreiko S. S., Fedoseev A. K. Gas-dynamic roof fall during the potash deposits development. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 246. pp. 601–609.
19. Shemet S. F., Shutin S. G. Protection of potassium mines from brine inflows. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 2. pp. 36–40.
20. Kuranov A. D., Bagautdinov I. I., Kotikov D. A., Zuev B. Yu. Integrated approach to safety pillar stability in slice mining in the Yakovlevo deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 115–119. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.23
21. Bohnsack D., Potten M., Freitag S., Einsiedl F., Zosseder K. Stress sensitivity of porosity and permeability under varying hydrostatic stress conditions for different carbonate rock types of the geothermal Malm reservoir in Southern Germany. *Geothermal Energy*. 2021. Vol. 9. 15. DOI: 10.1186/s40517-021-00197-w
22. Petrakov D. G., Penkov G. M., Zolotukhin A. B. Experimental study on the effect of rock pressure on sandstone permeability. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 244–251.
23. Farid A. T., Rizwan M. Prediction of in situ Permeability for Limestone Rock Using Rock Quality Designation Index. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. 2017. Vol. 11, No. 10. pp. 948–951.
24. Ting Zhao, Yabin He, Li Song, Xiao Li, Xiaojuan Chen. Research on the Relationship between Electrical Parameters and Relative Permeability of Tight Sandstone. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, Iss. 2. pp. 2147–2159.
25. Shabarov A. N., Kuranov A. D., Kiselev V. A. Assessing the zones of tectonic fault influence on dynamic rock pressure manifestation at Khibiny deposits of apatite–nepheline ores. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 3–7. DOI: 10.17580/em.2021.02.01
26. Shabarov A., Kuranov A., Popov A., Tsirel S. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass. *Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Masses: Proceedings of the 1st International Scientific Conference*. 2019. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 129. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901011
27. Lamur A., Kendrick J. E., Eggertsson G. H., Wall R. J., Ashworth J. D. et al. The permeability of fractured rocks in pressurised volcanic and geothermal systems. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. 6173. DOI: 10.1038/s41598-017-05460-4
28. Kozhevnikov E. V., Turbakov M. S., Riabokon E. P., Poplygin V. V. Effect of Effective Pressure on the Permeability of Rocks Based on Well Testing Results. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 8. 2306. DOI: 10.3390/en14082306
29. Mokhov A. V. Transformation of rock permeability at the underground mining areas of hard coal deposits (geomechanical aspects). *Nauka Yuga Rossii*. 2018. Vol. 14, No. 2. pp. 42–54.
30. Meye S. M., Zhenzhong Shen. Research on the Permeability Characteristics of Granite with Different Weathering Degrees before and after the Influence of Mining Method Construction. *Engineering*. 2020. Vol. 12, No. 6. pp. 382–400.
31. Fengda Zhang. Research on rock permeability and failure characteristics under different loading and unloading paths. *Acta Geophysica*. 2022. Vol. 70, Iss. 3. pp. 1363–1371.
32. Rogov E. A. Study of the well near-bottomhole zone permeability during treatment by process fluids. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 242. pp. 169–173.
33. Grachev S. I., Korotenko V. A., Kushakova N. P. Study on influence of two-phase filtration transformation on formation of zones of undeveloped oil reserves. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 68–82.
34. Shestakov V. M. Hydrogeomechanics: Tutorial. Moscow: Izdatelstvo MGU, 1998. 72 p.
35. GOST 23278–2014. Soils. Field methods for determining permeability. Moscow: Standartinform, 2015. 35 p.
36. Thiem G. Hydrologische Methoden. Leipzig, 1906.
37. Moye D. G. Diamond Drilling for Foundation Exploration. *Civil Engineering Transactions*. 1967. Vol. 9, No. 1. pp. 95–100.



С. В. Матва,
заместитель
директора –
технический директор
АО «Угольная
компания
«Кузбассразрезуголь»

Дальнейшее развитие открытого способа добычи угля в Кузбассе сопряжено как с вводом в строй новых угледобывающих предприятий, так и с реконструкцией действующих разрезов, срок эксплуатации которых на наиболее крупных объектах региона, таких как Бачатский и Краснобродский, превысил 70 лет. Реконструкция объектов открытой разработки предполагает увеличение глубины горных выработок и возрастание объемов вскрыши, при этом возникают актуальные научно-технические задачи оптимизации параметров горнотехнических объектов – бортов, уступов, отвалов и обеспечения безопасных условий их формирования. Решение данных задач на разрезах компании длительное время осуществлялось совместно с отраслевым институтом ВНИМИ, а в настоящее время – с привлечением специалистов Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета. В последнее десятилетие наиболее значимыми геомеханическими задачами являлись: обоснование параметров бортов глубиной до 500 м и отвалов высотой до 300 м; размещение сухих отвалов на территории законсервированных гидроотвалов; частичное удаление намывных массивов с целью отработки законсервированных запасов; разработка автоматизированных систем онлайн-мониторинга безопасности (устойчивости) горнотехнических объектов; обоснование использования отвальных пород в качестве рекультиванта и др. Их решение позволяет получить значительный экономический эффект за счет извлечения законсервированных запасов угля, сокращения площадей земельного и горного отвода, расходов на рекультивацию и транспортировку вскрышных пород до отвалов и др.