

УДК 622.002.68

**А.А. Шилин, О.С. Каледин**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЗАХОРОНЕНИЯ  
ОТХОДОВ В ПОДЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
КАЛИЙНОГО РУДНИКА**

Семинар № 18

**В** настоящее время существует большое количество отработанных шахт и рудников, подлежащих закрытию. С другой стороны, при постоянно растущих темпах производства на земле создаются большие объемы отходов, часть из которых является токсичными. Поэтому весьма актуальным стал вопрос о разработке технологии изоляции вредных отходов в выработках отработанных горных предприятий. Таким образом может быть решена проблема устранения больших объемов отходов, а также сокращения расходов на закрытие горных предприятий.

Так, рудник Тойченталь (ФРГ) находится под крупным населенным пунктом. Согласно нормам по закрытию горных предприятий в Германии, все выработки при закрытии должны быть заполнены для предотвращения просадок земной поверхности в будущем. Общий объем выработанного пространства рудника составляет 200000 м<sup>3</sup>. Для экономии средств на закрытие было принято решение использовать выработанное пространство рудника для захоронения низкотоксичных отходов.

Ранее захоронение отходов в калийных солях не производилось из-за сложных геомеханических условий в залежах калийных солей, высокой

гигроскопичности пород, приводящей к выветриванию и увеличению проницаемости слагающих пород, а также агрессивности среды в калийных рудниках.

В ходе работ по изучению пород рудника была выделена пористая разукрепленная зона в массиве вокруг выработок. Такая зона возникает сразу после сооружения выработки в результате высокой химической активности и гигроскопичности пород, слагающих массив. Состав слагающих пород дан в Таблице 1. Порода поглощает влагу из воздуха, в результате чего в породном массиве происходят химические реакции. Результатом реакций является разупрочнение и появление пористости в приконтурной части породного массива.

Опасность этого состоит в том, что в случае поступления воды к хранилищу, вредности могут распространиться на большие расстояния по трещинам и нарушениям в обделке и приконтурном массиве, а также по капиллярам и порам в приконтурной части массива. Под действием горного давления через некоторый промежуток времени зараженные воды могут поступать обратно в водоносные горизонты, что может повлечь крупномасштабные экологические катастрофы.

### Содержание минералов в пробе породы [1]

Проба	Карналлит, %	Тахидрит, %	Кизерит, %	Галит, %	Нераств. частицы, %	Влажность, %
1	53,00	15,98	15,47	12,96	0,82	1,81
2	74,06	8,54	5,27	9,96	1,08	1,07
3	51,66	9,70	3,62	33,47	0,53	1,10
4	55,87	17,08	4,70	19,31	1,18	1,91
5	53,30	2,96	5,18	7,42	0,15	1,02
6	56,05	17,94	4,19	18,50	1,34	1,99

Обычно для изоляции полей захоронения отходов от притока грунтовых вод используют массивные перемычки протяженностью до 30 м. В данном случае грунтовые воды могут обходить перемычки по разуплотненной зоне.

Для надежной изоляции токсичных отходов в калийных солях необходимо было разработать технологию возведения защитных перемычек и проведение дополнительных мероприятий по защите породного массива и уплотнению контактной зоны перемычки и породного массива.

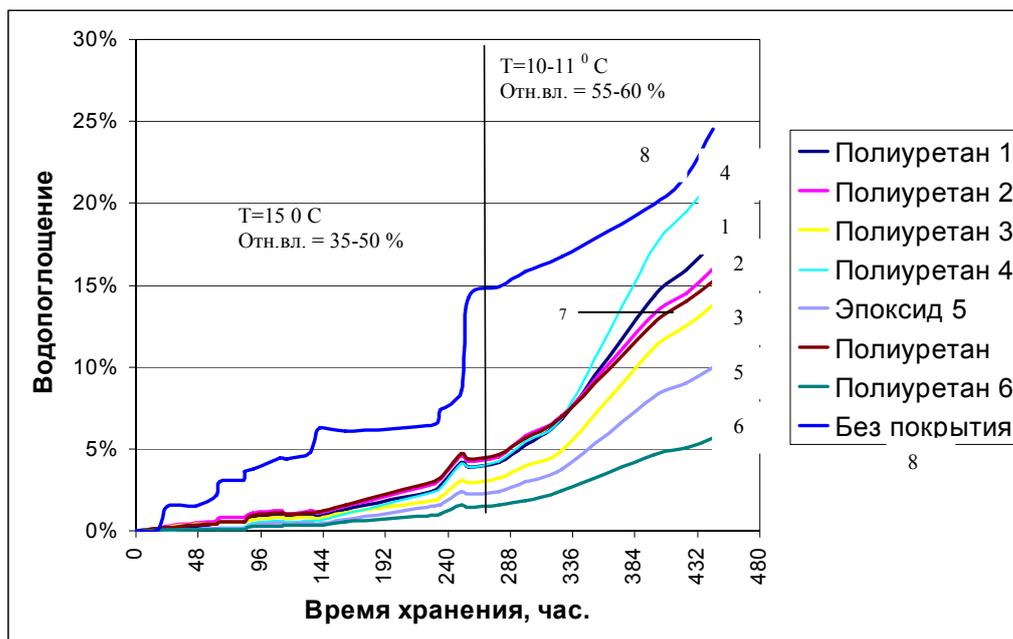
В ходе проводимых в Техническом Университете г. Фрайберга (ФРГ) исследований был разработан состав бетона на магнезиальном вяжущем, который в наименьшей степени взаимодействует с активными породами, а также не дает усадки при отвердевании [2]. Однако, в процессе возведения перемычек, несмотря на отсутствие усадки при отвердевании, при укладке бетона по контуру перемычки образуется зона увеличенной проницаемости из-за повышения температуры при отвердевании бетона и обуславливаемого этим ускорения разрушения пород под действием влаги.

Для устранения этого недостатка было решено производить уплотнение контактной зоны между перемычкой и породой с помощью инъекций полимерных составов. Этот выбор обусловлен

тем, что относительно малая проницаемость и высокая химическая активность породы не позволяет проводить инъекции минеральными вяжущими.

Ранее полимерные составы при захоронении отходов не применялись, так как при сооружении надежных подземных хранилищ необходимо использование долговременно-стабильных материалов, а полимерные материалы активно применяются в промышленности только в последние 50 лет, поэтому их стабильность в течение 50-100 лет не является очевидной. Долговечность гидроизоляционной мембраны для сооружений данного типа должна составлять 100-150 лет. Этот срок выбран из-за способности соляных пород к «реологической текучести» – то есть кальматации пор и трещин под действием горного давления [3].

На основе анализа данных литературы и проведенных экспериментов по ускоренному старению материалов было установлено, что изменение свойств полимерных материалов (полиуретанов и эпоксидов) происходит только из-за диффузии молекул соляных растворов в полимер. При этом, зная скорость диффузии агрессивных частиц, можно спрогнозировать время разрушения гидроизоляционной мембраны. Таким образом, можно создать гидроизоляционную мембрану, мощность которой в направлении



**Рис. 1. Результаты наблюдения за водопоглощением образцов карналлитита, покрытых различными составами**

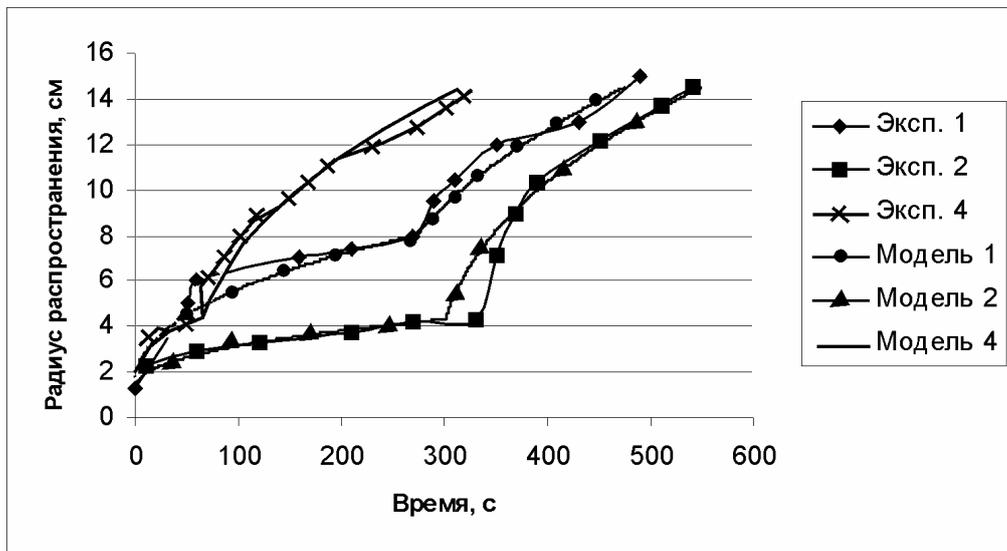
диффузии будет больше, чем глубина проникновения агрессивных частиц в течение 100-150 лет.

Согласно исследованиям [4,5] глубина нарушенной зоны в калийных солях составляет 5-20 см. При этом размер трещин не позволяет рассматривать их как макротрещины, то есть приконтурная часть массива пород представляет из себя пористое тело с микропорами размером 0,001-0,01 мм. При этом в разрушенной зоне можно выделить зоны, где выветривание уходит гораздо глубже, чем в окружающей области. Такие области массива можно рассматривать как макро-трещины. Как уже было сказано, на поверхности контакта бетона и породы создается зона повышенной проницаемости. Ее появление обусловлено повышением температуры породы при укладке бетона, что влечет за собой ускорение разрушения гигроскопичной породы.

В ходе работы была проверена возможность применения в условиях калийного рудника полимерных составов ведущих европейских производителей. В результате проведенных экспериментов было выяснено, что для применения в вышеописанных условиях подходят двухкомпонентные не гидроактивные полиуретановые и эпоксидные составы. Акрилатные составы в соляных породах не полимеризуются, что исключает их применение.

Для проведения дальнейших экспериментов были выбраны низковязкие эпоксидные составы, так как в отличие от полиуретанов они обеспечивают более прочное соединение.

Также были проведены исследования по защите приконтурной зоны массива от выветривания. Для этого в качестве покрытий были проверены различные полиуретановые и эпоксидные составы.



**Рис. 2. График движения жидкости согласно модели и его сравнение с экспериментальными данными**

сидные составы. Результаты наблюдения за водопоглощением образцов карналлитита, покрытых различными составами, показаны на рис. 1.

Для создания непрерывной гидроизоляционной мембраны по всей протяженности перемычки была разработана математическая модель распространения инъекционного материала в шве между перемычкой и породой [6]. Модель основывается на представлении шва как тонкой трещины. За основу для построения модели были взяты законы распространения жидкости в трещинах Ломизе [7].

Описание распространение фронта течения основывается на уравнении Вайсбаха-Дарси:

$$I = \frac{dP}{dr} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{D_h} \cdot \lambda \cdot V^2 \quad (2)$$

где  $\frac{dP}{dr}$  - градиент давления в направлении распространения;  $\lambda$  - коэффи-

циент сопротивления;  $V$  - скорость течения;  $D_h$  - гидравлический диаметр распространения;  $\rho$  - плотность жидкости.

Модель была адаптирована для расчета распространения инъекционного материала при проведении инъекций с помощью инъекционных систем (перфорированных или матерчатых шлангов). Скорость распространения фронта волны определяется по формуле:

$$\frac{dR_{\max}}{dt} = \frac{P(R_{\max}) - P(R_0)}{R_{\max} \cdot \ln\left(\frac{R_{\max}(t)}{R_0}\right)} \cdot \frac{h^2}{12 \cdot c \cdot \eta}$$

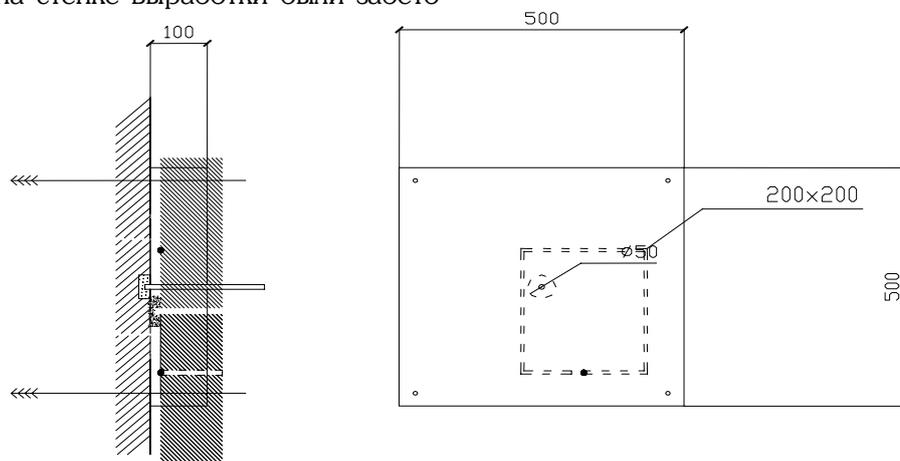
где  $h$  - ширина шва,  $c$  - характеристика проницаемости шва;

Для испытания достоверности модели были проведены лабораторные испытания на стенде, а так же испытания в натуральных условиях. Испыта-

ния на стенде показали высокую степень сходимость результатов (рис. 2)

Для испытаний в натуральных условиях на стенке выработки были забето-

нированы 8 участков размером 50х50 см, на этих участках до бетонирования были укреплены инъекционные



**Рис. 3. Схема эксперимента**

системы. В центре участков были пробурены шпуров диаметром 20 мм и глубиной 30 мм, в которые вставлялись металлические трубки (до бетонирования) для нагнетания воздуха с целью замера проницаемости

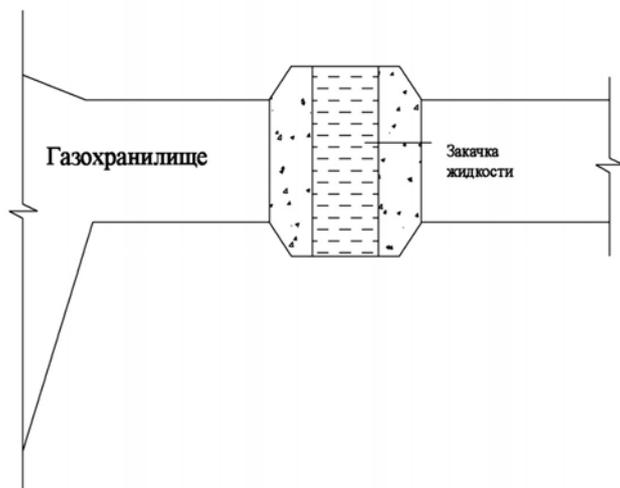
Проницаемость соединения измерялась до и после нагнетания полимерных составов в шов путем нагнетания воздуха через трубку в центре плиты, последующего замера времени падения давления воздуха и обработки результатов этих замеров согласно вышеописанной модели. При нагнетании полимерных материалов в шов между бетоном и породой отслеживались смещения бетонной плиты под действием инъекционного давления, которые могли бы повлечь отрыв плиты от забоя, а также увеличение проницаемости шва. Давление нагнетания было ограничено 3 МПа. Смещений при проведении инъекций выявлено не было.

Во всех случаях было зафиксировано снижение проницаемости соединения до  $10^{-18}$  -  $10^{-19}$  м<sup>2</sup>.

После проведения экспериментов бетонные плиты были отделены от забоя, с них были смыты остатки карналлитита, при этом часть породы, укрепленная эпоксидным составом, осталась нерастворенной. Таким образом было измерено максимальное распространение инъекционного состава в шве. Измеренные значения показали хорошую сходимость с результатами моделирования.

Для пресечения движения жидкости в капиллярах в породном массиве вокруг выработок был опробован метод устройства «гидрозамка». Данный метод широко применялся при строительстве подземных газонефтехранилищ в соляных породах для подавления капиллярных утечек жидкости и газа из хранилища (рис. 4).

Для проверки возможности применения данного способа в калийном



**Рис. 4. Гидрозамок при сооружении подземного газохранилища**

руднике «Тойченталь» были пробурены скважины диаметром 120 мм, глубиной 40 см. На дне скважин был насыпан слой 10 см гравия, затем скважины были забетонированы. Через стальную трубку в забетонированные скважины было произведено нагнетание различных соляных растворов и наблюдалось изменение давления в камере. В качестве растворов для гидрозамок были опробованы:

- насыщенный раствор  $\text{NaCl}$ ;
- насыщенный раствор  $\text{CaCl}_2$
- насыщенный раствор, полученный при растворении краналлитита.

При нагнетании растворов соли и краналлитита происходило быстрое падение давления в скважине, что было обусловлено растворением высокоактивного тахидрита и оттоком раствора по образовавшимся порам. При нагнетании раствора  $\text{CaCl}_2$  (который инертен к тахидриту) произошло следующее: сначала происходило падение давления из-за растворения окружающего краналлитита, но через некоторое время давление начало расти из-за происшедших процессов кристаллизации и выпадения в осадок новых нерас-

творимых соединений. Таким образом, после нагнетания в скважине образовалась непроницаемая оболочка.

Данное явление решено было использовать для пресечения капиллярных токов жидкости в комплексе с уплотнением шва с помощью инъекций полимерных материалов.

Таким образом, на основе полученных результатов исследований была разработана технология сооружения перемычки для надежной изоляции токсических отходов в выработанном пространстве закрываемого калийного рудника. Предложенная технология предусматривает проведение предварительных мероприятий (защита массива от выветривания) и последующих мероприятий (уплотнение шва между бетоном и породой с помощью инъекций полимерных составов) для повышения надежности системы защитных сооружений против проникновения вод к месту захоронения отходов. При этом обеспечивается возможность производить замеры проницаемости соединения во время сооружения перемычки и по этим данным выбирать технологические параметры для проведения инъекционных работ. Это позволяет более точно определить параметры массива и провести работы, учитывая особенности массива горных пород в месте строительства. В результате будет создана непрерывная

гидроизоляционная оболочка, которая может оставаться стабильной под

агрессивным влиянием среды калийного рудника.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *BMBF-Vorhaben "Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke"* TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Prof. Dr.-Ing. W. Kudla, 2004

2. *Wittke: Permeabilität von Steinsalz – Theorie und Experiment.* – Verlag Glyskauf GmbH, Essen 1999.

3. *Salzer, K., Zwischenbericht von IFG Leipzig zum BMBF-F/E-Vorhaben "Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendamme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV"* vom 15.06.2006

4. *Wasowitz, B.* Untersuchungen zum Einsatz von Magnesia-Beton im Kontakt mit Kalisalzgestein. Interner Bericht TU Bergaka-

demie Freiberg, Institut für Bergbau, 2005, unveröffentlicht.

5. *Gruner, M.* Untersuchungen zum Einsatz von MgO-zementsuspensionen zur Abdichtung Carnallit. Interner Bericht, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 2005, unveröffentlicht.

6. *Kaledin, O.:* Polymer injektions for hermetic sealing of dams for disposals of toxic wastes in salt formations. Freiburger Forschungshefte, C512, 2007, TU Bergakademie Freiberg, 2007 s. 113-117.

7. *Ломидзе Г.И.:* Фильтрация в трещиноватых породах, Госэнергоиздат, 1961..

**ГИАБ**

#### Коротко об авторах

*Шилин А.А.* – профессор, доктор технических наук,

*Каледин О.С.* – аспирант,

Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 18 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. Б.А. Каргозия.

