

**С.Д. Воронкевич, С.Н. Емельянов, С.В. Морозов,
Н.Г. Максимович**

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ КАЧЕСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС В СКАЛЬНЫХ РАСТВОРИМЫХ ГРУНТАХ

(Энергетическое строительство. - 1987. - № 7. - С.15-18)

По мере дальнейшего освоения гидроэнергетического потенциала все чаще возникает необходимость возведения крупных гидроэнергетических сооружений в неблагоприятных инженерно-геологических условиях, в том числе на скальных растворимых грунтах, к которым относятся грунты, имеющие в своем составе гипс, каменную соль, сильвин. Обеспечение надежности гидросооружений на таких основаниях приобретает особую актуальность.

Как показывает зарубежный опыт, при строительстве на таких основаниях плотин без выполнения каких-либо мероприятий по защите пород от растворения в процессе эксплуатации в основании образуются полости, что может привести к разрушению сооружения (плотина Сен-Френсис высотой 63 м, США). Вместе с тем более чем 30-летний период эксплуатации Камской ГЭС свидетельствует о возможности возведения плотин на растворимых скальных грунтах. В настоящее время на таких грунтах строятся плотина Рогунской ГЭС и Нижне-Каферниганская плотина [1, 2].

Одним из наиболее распространенных противофильтрационных мероприятий в основании плотин являются завесы. Для обеспечения защиты гипсов и солей от растворения завесы должны обладать высокой плотностью. Новый эффективный способ создания таких завес – поэтапная инъекция цементных и химических растворов. В таблице приведены примеры применения химических растворов для создания высокоплотных противофильтрационных завес в основании плотин.

Однако достигнутое высокое качество противофильтрационных завес снижается со временем в результате различных физико-химических процессов, протекающих в закрепленном массиве между инъецируемыми растворами, их компонентами и продуктами искусственной цементации, с одной стороны, и породами и подземными водами – с другой. Эти постинъекционные процессы отражаются на фильтрационных параметрах завес и окружающих их пород. Прогноз количественных изменений свойств противофильтрационных завес приобретает все большее значение, как для проектирования их конструкций, так и для организации работы эксплуатационных служб, которые могут более целенаправленно проводить контроль и планировать реставрацию завес.

**Примеры применения химических растворов для создания
высокоплотных противофильтрационных завес в основании плотин**

Гидроузел (страна)	Литологические типы пород основания	Применяемые растворы	Удельное водопоглощение, л/мин	Причины применения химических растворов	Литера- турный источник
Камская ГЭС (СССР)	Мергели, доломиты, гипсы, ангидриты, известняки, аргиллиты, алевролиты	Шавелевоало- мосиликатный	0,005	Снижение эффективности цементационной завесы	[3]
Перепадная ГЭС-1* (СССР)	Песчаники, глины, конгломераты	То же На основе ФРЭС	0,004 0,016	Наличие тонко трещиноватых пород, не поддающихся цементации	[4] [5]
Рогунская ГЭС* (СССР)	Аргиллиты, алевролиты, песчаники, гипс, каменная соль	На основе эпоксидной смолы ТЭГ-1	0,007	Создание высокоплотного экрана для защиты пласта соли	[6]
Коунас- Форд (США)	Граниты	То же АМ-9	Около 0	Недостаточная плотность цементационной завесы	[7]
Кайнджи (Нигерия)	Граниты и алевролиты	На основе резорциноформаль- дегидной смолы	-	То же	[8]
Бу- Ханифия (Алжир)	Песчаники, пески, глины	На основе силиката натрия	-	Неэффективность цементации	[9]
Гриб (Алжир)	Мергели, песчаники	То же	Снижено на 99,6%	То же	[9]
Фодда (Алжир)	Известняки	Силикат натрия и серноокислый алюминий	-	Наличие тонко трещиноватых пород	[9]
Фентган (КНР)	Песчаники	На основе полиуретана	-	Необходимость повышения качества цементационной завесы	[10]
Ченцун (КНР)	Брекчии и меланиты	То же	-	То же	[10]

*На этих ГЭС проведены опытные работы

В проблемной лаборатории геологического факультета МГУ в течение ряда лет проводились систематические исследования постинъекционных процессов и их влияния на проницаемость противофильтрационных завес. Экспериментально-теоретические исследования и натурные наблюдения были направлены на решение следующих основных задач:

- изучение механизма, кинетики и динамики взаимодействия раство-

римой составляющей пород (в частности, гипсов) с постинъекционными растворами;

- определение изменения во времени водопроницаемости скальных грунтов (как в естественном состоянии, так и уплотненных цементными и химическими гелеобразующими растворами);
- разработку критериев для количественных оценок влияния формирования и развития во времени техногенно-геохимических процессов на фильтрационные параметры пород и завесы.

Для решения этих задач были выбраны условия Камской и Рогунской ГЭС. Разносторонний опыт, накопленный в ходе исследований, послужил основой для разработки общих принципов методики оценки изменения качества противофильтрационных завес в скальных растворимых грунтах, которая состоит из нескольких основных этапов (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы методики оценки изменения качества противофильтрационных завес

На начальном этапе проводится анализ материалов по геологическому строению закрепленного массива, его геохимическому составу и гидрогеологической обстановке. На основании этих данных **схематизируются постинъекционные условия** существования завесы, т. е. создается модель массива, в которой отражены пространственное взаиморасположение и взаимодействие его компонентов – пород, продуктов искусственной цементации, подземных вод, постинъекционных растворов (специфический тип техногенных флюидов, циркулирующих в порово-трещинном пространстве и содержащих компоненты инъецируемых растворов и продукты химической реакции), их физико-химическая активность и характер массопереноса. Последним шагом схематизации постинъекционных условий является выделение двухкомпонентных систем, в которых можно ожидать активного протекания постинъекционных процессов. К числу таких систем относятся: «гель хими-

ческого раствора — подземные воды», «постинъекционные растворы — гипс», «гель химического раствора—гипс», «скальный грунт — цементный камень», «скальный грунт — гель химического раствора».

Для составления достоверной схемы постинъекционных условий имеет большое значение целенаправленный анализ природных геохимических процессов, которые могут рассматриваться в качестве природных аналогов при прогнозировании образования и развития техногенно-геохимической обстановки. Привлечение **природных аналогов** целесообразно и при сопоставлении прогнозных и фактических данных об изменении качества завес.

Натурные наблюдения проводятся в целях контроля за изменениями в данной техногенно-геохимической системе. Размещение КИА для натуральных наблюдений должно обеспечивать возможность проверки прогнозов изменения качества противодиффузионных завес и проведения обратных расчетов для определения проницаемости пород в основании плотин и завесы. Натурные наблюдения обычно включают в себя контроль за напором диффузионных потоков и химическим составом подземных вод. Пьезометры располагаются по профилям, ориентированным максимальным приближенно к путям диффузии.

Одним из важнейших этапов оценки изменения качества противодиффузионных завес являются **лабораторные и экспериментальные исследования**. В процессе этих исследований изучаются выделенные при схематизации постинъекционных условий двухкомпонентные системы в целях получения представления о качественном характере механизма процессов, протекающих в массиве. Лабораторные опыты позволяют выявить основные факторы, обуславливающие те или иные процессы, и установить их относительную значимость, исследовать физико-химическую сущность процессов, изучить направленность изменений в твердой фазе пород и гелей химических растворов.

Изменения во времени коэффициента диффузии K_{ϕ} выделенных двухкомпонентных систем служат количественным критерием суммарного проявления всех физико-химических процессов в массиве пород и положены в основу оценки изменения качества завес. Изучение закономерности изменения диффузионных свойств, например системы «скальный грунт—тампонажный материал», осуществлялось на образцах скальных пород основания Рогунской ГЭС. В центральной части образцов, выпиленных из керна и имевших толщину 1-2 см, просверливались отверстия диаметром 2 мм. Суммарная площадь отверстий составляла 6 % общей площади диффузии через образец. Затем отверстия заполнялись цементным раствором (В/Ц — 0,5) или химическим гелеобразующим раствором на основе эпоксидной смолы ТЭГ-1 [6]. Образцы помещали в диффузионный прибор, конструкция которого описана в [11], и через них в квазистационарных ус-

ловиях осуществлялась фильтрация воды при градиентах напора от 1 до 100. В результате были получены два типа закономерностей изменения коэффициента фильтрации. Как видно из графиков, показанных на рис. 2, для систем «аргиллит (или песчаник) гаурдакской свиты – гель ТЭГ-1» характерно наличие трех участков: начального, на котором происходит постепенное увеличение K_{ϕ} , участка резкого возрастания K_{ϕ} ; участка, на котором коэффициент фильтрации либо незначительно увеличивается, либо остается без изменений. Для систем «аргиллиты (или песчаники) – цементный камень», а также для ненарушенных образцов верхнеюрских аргиллитов и песчаников гаурдакской свиты характерно увеличение K_{ϕ} по линейной зависимости (рис. 3). Именно эти закономерности изменения коэффициента фильтрации во времени приняты в расчетах изменения качества противофильтрационных завес.

Результаты исследований систем «гель – подземные воды», «постинъекционные растворы – гипс», «гель – гипс» приведены в [12, 13].

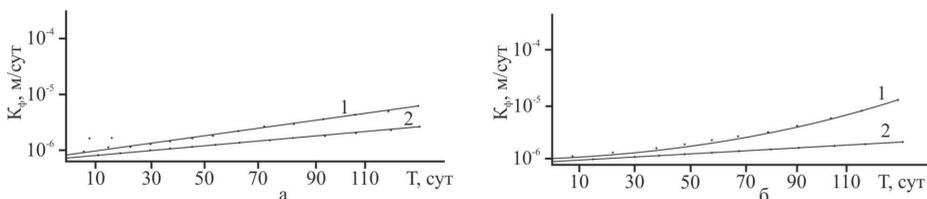


Рис. 2. Изменение коэффициента фильтрации системы «песчаник – гель» (а) и системы «аргиллит – гель ТЭГ-1» (б) при фильтрации дистиллированной воды с градиентами напора: 1- 100; 2 - 10; 3- 1

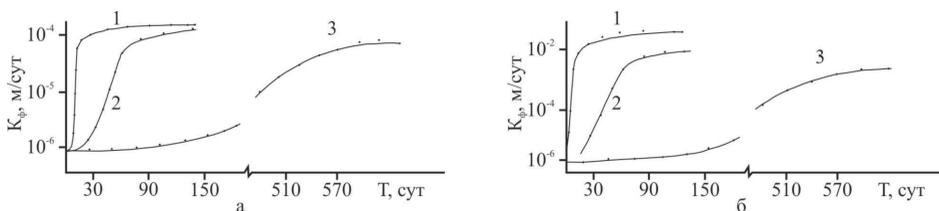


Рис. 3. Зависимость $K_{\phi}=f(T)$ при фильтрации дистиллированной воды: а – с градиентом напора 10 для систем: 1 – «аргиллит – цементный камень»; 2 – «песчаник - цементный камень»; б - с градиентом напора 100 для ненарушенных образцов: 1 – аргиллитов; 2 – песчаников гаурдакской свиты в основании Рогунской ГЭС

Математическое моделирование изменения качества завес проводится для количественной оценки суммарного проявления во времени всех постинъекционных процессов, которые отражаются на изменении свойств (прежде всего водопроницаемости) техногенно-геохимической системы. Такое моделирование – один из основных этапов исследований по разработанной комплексной методике. В связи с необходимостью наиболее полного учета при моделировании инженерно-геологических условий все чаще применяются численные методы расчета на ЭВМ, например метод конечных элементов. Математическое моделирование методом конечных элементов выполняется для решения обратных задач. Обратные расчеты позволяют по данным натурных наблюдений за изменениями напоров фильтрационных потоков вычислить изменения коэффициента фильтрации пород в техногенно-геохимической системе и определить размеры зон, в которых произошли эти изменения. При такой постановке задачи можно по данным натурных наблюдений анализировать динамику состояния техногенно-геохимической системы и осуществлять контроль за этим состоянием с использованием постоянно действующей модели. Более подробно методика обратных расчетов и ее применение при анализе изменения качества противofильтрационной завесы в основании Камской ГЭС изложены в [1].

Математическое моделирование методом конечных элементов применяется и для решения прямых задач прогнозирования состояния техногенно-геохимической системы. Эти задачи решают также для выявления основных факторов, влияющих на развитие данной техногенно-геохимической системы, и корректировки объема и состава инженерно-геологических исследований. При этом решение обратной задачи может быть использовано для уточнения значений фильтрационных параметров.

В процессе математического моделирования методом конечных элементов изменения качества высокоплотного противofильтрационного экрана, защищающего пласт соли в основании Рогунской ГЭС, выполнена серия расчетов нестационарной двухмерной напорной анизотропной фильтрации несжимаемой жидкости через уплотненный массив.

На основании данных, полученных в лабораторных экспериментах (см. рис. 2), зависимость изменения во времени коэффициентов фильтрации закрепленного массива задавалась S-образного типа. График этой зависимости аппроксимировался ступенчатой функцией.

В качестве критериев эффективности высокоплотного экрана приняты (рис. 4) расходы потока подземных вод через его элементы: 1 – сверху пласта соли, 2 и 3 – со стороны соответственно нижнего и верхнего бьефов. В элементе 1 суммируются вертикальные расходы, в элементах 2 и 3 – горизонтальные. Период эффективной работы высокоплотного противofильтрационного экрана определяется временем, в течение которого расходы

потока через выделенные элементы возрастут до значений, соответствующих расходам цементации. Анализ полученных данных (рис. 4 а) показывает, что при монотонном увеличении во времени коэффициента фильтрации экрана расходы через выделенные элементы изменяются по более сложным зависимостям. Расходы через элементы 1 и 2 близки между собой и превышают расход через элемент 3 примерно в 20 раз во всем исследованном временном интервале. Через 10-12 лет расходы потоков в элементах 1 и 2 достигнут уровня, соответствующего состоянию массива после проведения цементационных работ, что и определяет эффективный период работы экрана. Более подробно результаты исследований изложены в [14].

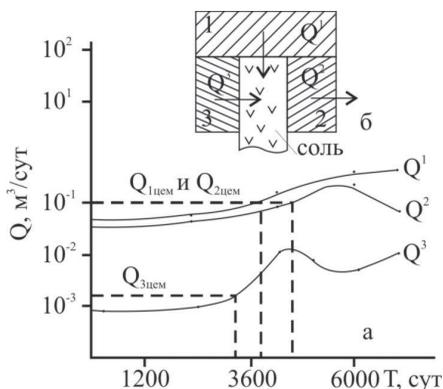


Рис. 4. Результаты математического моделирования изменения суммарных расходов (а) через выделенные элементы (б) защитного экрана пласта соли, залегающего в основании Рогунской ГЭС ($Q_{1\text{цемент}}$, $Q_{2\text{цемент}}$, $Q_{3\text{цемент}}$ – расходы через соответствующие элементы экрана при их плотностях, достигнутых инъецированием цементных растворов)

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа химической активности природной среды и инъецируемых в скальный массив материалов можно выделить системы, наиболее важные с точки зрения исследования протекающих в них физико-химических процессов, влияющих на фильтрационные свойства пород. К таким системам относятся «гель – подземные воды», «инъекционный раствор–подземные воды», «гипс–постинъекционные растворы», «гель – гипс», «грунт – подземные воды», «грунт–тампонажный материал (цемент, гель) – подземные воды» и др.

2. Лабораторные эксперименты показали, что при воздействии на гипс силикатных химических растворов и их компонентов на поверхности гипса образуются пленки труднорастворимых химически стойких соединений (оксалатов и гидросиликатов кальция). При этом увеличивается объем твердой фазы, т. е. происходит дополнительное тампонирующее трещин в массиве гипсоносных пород. Однако исследованиями системы «грунт–тампонирующий материал–подземные воды» установлено, что в определенных условиях со временем коэффициент фильтрации возрастает. Выявлены также два типа зависимости его изменения под влиянием постинъекционных процессов: линейная и S-образная. Эти зависимости пригодны для оценки изменения качества противofильтрационных завес.

3. Разработана комплексная методика прогноза количественного изменения свойств противofильтрационных завес, включающая в себя лабораторные и натурные эксперименты по выявлению влияния физико-химических процессов на изменение во времени коэффициента фильтрации пород и математическое моделирование изменения во времени фильтрационных параметров завес путем выполнения комплекса взаимосвязанных расчетов на ЭВМ методом конечных элементов. Эта методика позволяет получать более надежные, чем раньше, результаты конкретных расчетов параметров завес и экранов, возводимых в сложных инженерно-геологических и гидрохимических условиях, выбирать оптимальные для данных геохимических условий инъекционные растворы, целенаправленно контролировать фильтрационный поток в основании плотин и заблаговременно предусматривать работы по восстановлению плотности завес и экранов.

Список литературы

1. Воронкевич С. Д., Емельянов С. Н., Максимович Н. Г. Моделирование методом конечных элементов влияния постинъекционных процессов на эффективность противofильтрационной завесы// Приложение численных методов к задачам геомеханики (МИСИ). М., 1986. С. 90-99.
2. Демьянова Э. А. Растворение и вынос гипса фильтрационным потоком из пород основания плотин// Инженерная геология. 1986. № 6. С. 23-33.
3. Создание противofильтрационной завесы высокой плотности в гипсоносных карбонатных породах основания Камской ГЭС/ С. Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова, С. Н. Емельянов и др.// Строительство на закарстованных территориях. М.: Стройиздат, 1983. С. 123-125.
4. Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А., Сергеев В. И. Теоретические основы и результаты внедрения способа химического тампонирующего полускальных и скальных пород// Вопросы инж. геологии и грунтоведения. 1978. Вып. 4. С. 199-209.

5. Демин В.Ф., Попов Ю. Д., Аллас Э. Э. Опыт создания противofильтрационной завесы в карбонатных породах// Изв. ВНИИГ им. Ведынеева. 1978. Т. 122. С. 81-85.
6. Опыт применения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС/ С. Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова, Н. А. Ларионова и др.// Гидротехническое строительство. 1981. № 10. С. 11-15.
7. Мур Д. Противofильтрационные мероприятия на платине Коунас-Форд// Гражданское строительство. 1965. № 6. С. 11-16.
8. Адамович А. Н. Закрепление грунтов и противofильтрационные завесы в гидроэнергетическом строительстве. М.: Энергия, 1980.
9. Жинью М., Барбье Р. Геология плотин и гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1961.
10. Polyurethane groutings in hydraulic engineering// Grouting in Geotechnical Engineering. New York, 1982. P. 403-417.
11. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Сергеев В.И. Исследование фofильтрационно-осмотических процессов при создании плотных защитных экранов (на примере Рогунской ГЭС). М.: Изд-во МГУ, 1983.
12. Максимович Н.Г., Воронкевич С.Д. Взаимодействие алюмосиликатных гелей с минерализованными подземными водами и его инженерно-геологическое значение// Вестник МГУ. 1983. № 4. С. 78-87.
13. Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Влияние химического инъекционного закрепления на устойчивость гипса в основании гидротехнических сооружений// Гидротехническое строительство. 1983. № 7. С. 30-32.
14. Морозов С.В. Прогноз изменения проницаемости химически уплотненных скальных осадочных грунтов в противofильтрационных завесах: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1985.