

ИНЪЕКЦИОННЫЙ РАСТВОР ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ СОЛЕНОСНЫХ ПОРОД

Н. Г. Максимович (ЕНИ ПГНИУ)

АННОТАЦИЯ. *Гидроизоляция растворимых пород как способ, применяемый при проходке стволов в соленосных породах, создании противифльтрационных завес и др., представляет собой технически сложную задачу, требующую значительных затрат. Один из наиболее распространенных способов – цементация и инъекция химических реагентов. Эти операции, как правило, проводятся последовательно, что влечет дополнительные затраты.*

Ключевые слова: гидратация, водопроницаемость, водопоглощение, тампонаж, подземные воды, соли

INJECTABLE SOLUTION FOR HIGH EFFICIENCY DAMP PROOFING OF SALINIFEROUS ROCKS

N. Maksimovich (Natural Science Institute of Perm University)

ABSTRACT. *Waterproofing of soluble rocks as a method used for shaft sinking in saliniferous rocks, the creation of sealing curtain, etc., representing a technically complex task, which requires significant expenses. One of the most common ways - grouting and injection of chemicals. These operations, as a rule, are carried out consistently, which leads to additional costs.*

Key words: hydration, drainage properties, water absorption, plug-back, underground waters, salts

ЦЕМЕНТАЦИЯ

Решение проблем гидроизоляции наклонных стволов рудника Декханабадского завода осложняется наличием растворимых пород, что обуславливает особые требования к технологии подбора рецептур растворов. Преимущество способа цементации, обеспечивающее ему широкое развитие в строительстве, заключается в его технической простоте, удобстве применения и высокой надежности достигаемых результатов. Способ цементации достаточно экономичен и не требует особенно сложного оборудования. Сущность метода состоит в том, что через пробуренные скважины под давлением (от 3 до 70 атм.) нагнетается цементный раствор. Последний заполняет трещины и пустоты в грунте, уплотняется за счет отжатия воды, твердеет за счет гидратации цемента, в результате чего снижается водопроницаемость грунта и повышается его прочность. Возможность успешного и экономичного применения способа цементации зависит от: размера трещин и пор; скорости фильтрационного потока подземных вод; химического состава подземных вод.

Вследствие значительных давлений нагнетания, ветвистости и шероховатости трещин проникновение суспензионных растворов происходит по турбулентному режиму. В результате трения о стенки трещин или пор, под воздействием структурной вязкости, инъекционный раствор постепенно замедляет скорость движения и, переходя ее критическое значение, движется далее в ламинарном режиме, при котором физико-химические и химические процессы начинают преобладать над гидродинамическими. При этом напряжение сдвига одного слоя раствора относительно другого возрастает, а поверхность сдвига увеличивается. При достижении равенства величин статических напряжений сдвига в растворе, с одной стороны, и между этим раствором и грунтом, с другой, дальнейшее проникновение раствора в трещины грунта прекращается. Турбулентное движение суспензионного раствора, а следовательно и цементация грунтов возможны при ширине трещин более 0,1 мм.

Размер пор и трещин в известной степени характеризуется водопроницаемостью, величина которой в практике цементации грунтов определяется их удельным водопоглощением. В зависимости от удельного водопоглощения грунты делятся на 7 категорий (табл. 1); в соответствии с этим показателем изменяется состав цементных растворов (табл. 2)

ТАБЛИЦА 1. ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ГРУНТОВ ПО ИХ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ

Категории	Уд. водопоглощение, л/мин	Водопроницаемость	Примечание
1	< 0,001	Практически водонепроницаемы	Цементации не поддаются
2	0,001-0,01	Слабоводопроницаемы	
3	0,01-0,1	Водопроницаемые	Наиболее рациональны для цементации
4	0,1-1,0	Средневодопоницаемые	
5	1,0-10,0	Высоководопроницаемые	
6	10,0-100,0	Весьма высоководопоницаемые	Для карстовых пустот рациональна глинизация
7	> 100,0	Исключительно высоководопоницаемые	

ТАБЛИЦА 2. СОСТАВ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УДЕЛЬНОГО ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ ТАМПОНИРУЕМЫХ ГРУНТОВ

Удельное водопоглощение, л/мин	Весовое соотношение составляющих растворов			Соотношение В/Ц
	Цемент М-400 (Ц)	Вода(В)	Песок(П)	
От 0,01 до 0,1	1	8	0	8:1
0,1-0,5	1	6	0	6:1
0,5-0,1	1	4	0	4:1
1-3	1	2	0	2:1
3-5	1	1	3	1:1
5-10	1	0.5	3	0.5:1
>10	1	0.5	3	0.5:1

Скорость фильтрационного потока определяет консистенцию цементных растворов и технологию производства работ. Допустимая скорость фильтрационного потока при тампонаже трещиноватых пород является такой, при которой не происходит вынос инъецируемого суспензионного раствора за пределы обрабатываемого массива. Расчеты и практика работ по цементации показывает, что допустимая скорость движения подземных вод не должна быть более 200 м/сут. При значениях скоростей более указанной величины возможность применения цементации должна быть установлена опытным путем. Опасность размыва в этом случае может быть уменьшена при применении быстросхватывающихся цементов и ускорителей твердения цементного камня.

Химический состав подземных вод в зависимости от степени и характера минерализации, градиента фильтрации и температуры вод может вызвать разрушение цементного камня. Наиболее распространенным видом вредного воздействия минерализации подземных вод является сульфатная и карбонатная агрессии.

Расширение области применения цементации можно достигнуть путем вибродомола цемента, диспергированием частиц поверхностно-активными веществами гидрофильного или гидрофобного типа, использованием цементно-глинистых растворов, применением новых видов цемента на основе коллоидных растворов.

При инъекции кавернозных пород или очень крупных трещин, а также с целью экономии цемента в растворы вводят различные добавки: природный или молотый песок, молотый шлак, золы-уноса. Применение песка снижает усадочные деформации в цементном камне, которые отрицательно сказываются на сцеплении цементного камня со стенками трещин. Тонкомолотый песок или каменная мука могут вводиться в пределах соотношений к цементу 1:1. Примеры форм проникновения цементных растворов в различные типы грунтов приведены на рис. 1.

Производство работ по цементации грунтов сводится к следующему: 1) Бурение скважин для цементации и проверка заданного им направления. 2) Промывка скважин и трещин водой, испытание пород на водопроницаемость. От тщательной промывки скважин и трещин сильно зависит качество цементационных работ. Длительность и способ промывки зависит от характера материала заполнения. В породах, не содержащих легко растворимых минералов, промывку следует вести до осветления возвратной воды. В трудных случаях при значительном загрязнении трещин оказывается необходимой длительная промывка в течение нескольких часов.

Цементация для гидроизоляции соленосных пород является недостаточно эффективной, поскольку трещины размером менее 0,1 мм остаются незаполненными.

ХИМИЧЕСКИЕ РАСТВОРЫ

Для их тампонирования используются химические растворы обладающие высокой проникающей способностью.

Опыт успешного применения химических растворов для гидроизоляции растворимых пород имеется при решении проблем Рогунской ГЭС.

Строительство крупнейшей в Средней Азии каменно-набросной плотины Рогунской ГЭС высотой 320 м проходит в сложных инженерно-геологических условиях. Эта сложность определяется, в частности, и тем, что на участке створа долина р. Вахш пересекается Ионахшским разломом, включающим пласт каменной соли мощностью около 20 м. В целях предотвращения растворения пласта соли прорабатывались различные решения, включая защитные мероприятия и, в частности, создание противифльтрационного экрана путем инъекционного уплотнения пород, вмещающих каменную соль. Водопроницаемость такого экрана должна быть минимальной с целью максимального снижения растворения защищаемого пласта соли и определяется инженерно-геологическими и техническими условиями проведения инъекционных работ.

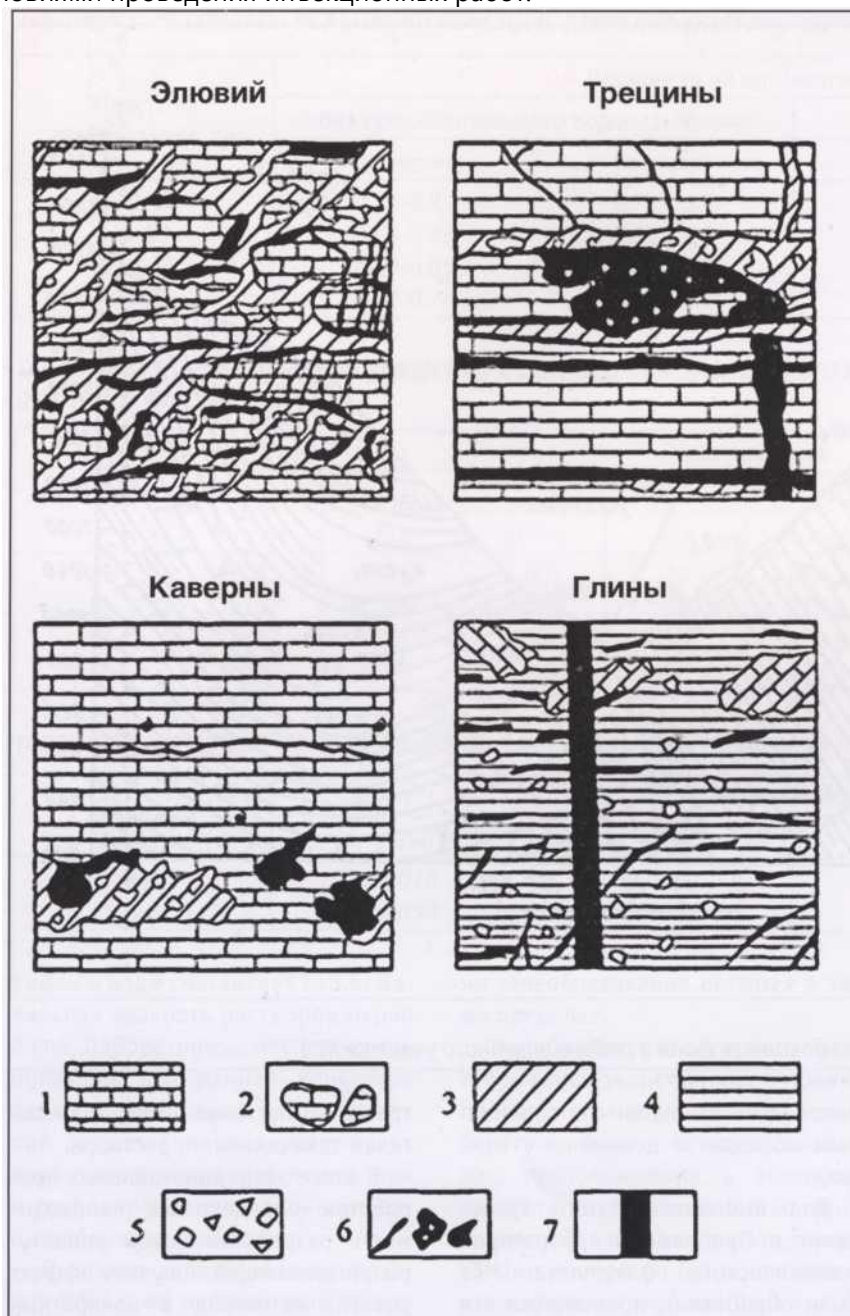


Рис. 1. Типичные примеры проникновения цементного раствора в различные типы грунтов.

1 — известняк; 2 — элювий известняка; 3 — суглинистый заполнитель трещин и каверн; 4 — глина;

5 — щебень известняка; 6 — цементный камень; 7 — зацементированный ствол скважины

Уникальность сооружения Рогунского гидроузла, сложные геологические и гидрогеологические условия определили необходимость совместного использования цементации и химического тампонирования пород для достижения максимальной плотности проектируемого экрана. Такого

подхода требовал и накопленный в настоящее время опыт доуплотнения цемзавесы в основании Камской ГЭС. Разработка эффективных способов химического инъекционного уплотнения и доуплотнения вмещающих соляной пласт пород была поручена проблемной лаборатории геологического факультета МГУ. В соответствии с поставленной задачей работа состояла из двух частей: лабораторный синтез гелеобразующего раствора, соответствующего предъявляемым требованиям, и его опытное опробование в районе створа плотины.

Участок ущелья р. Вахш в зоне инъекционных работ сложен породами верхнеюрского и нижнемелового возраста, которые представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов (рис. 2). Слои падают под углом 70° в сторону нижнего бьефа. Временное сопротивление сжатию по некоторым оценкам у алевролитов составляет 60–70 МПа, песчаников — 80–100 МПа, аргиллитов 40–50 МПа. Водопроницаемость пород на всем участке створа плотины довольно низкая, коэффициент фильтрации 0,05–0,25 м/сут, а с глубины 40–50 м от поверхности — 0,01 м/сут и менее.

В лежащем крыле Ионахшского разлома пласт соли контактирует с алевролитами и песчаниками нижнего мела. Песчаники среднезернистые, крепкие, тонкотрещиноватые с карбонатным цементом. Контакт между пластом соли, песчаниками и алевролитами плотный. Висячем крыле разлома пласт соли контактирует с верхнеюрскими аргиллитами. Коричневато-красные аргиллиты тонкотрещиноватые загипсованные. Гипс заполняет тонкие субвертикальные трещины шириной от 0,2 до 3,0 мм. Содержание гипса в аргиллитах колеблется от 4 до 20%. Согласно проекту, инъекционные работы по созданию защитного экрана выполняются ниже уровня подземных вод, которые в данном районе характеризуются высокой степенью минерализации. При приближении к пласту соли минерализация постепенно возрастает, достигая 170–180 г/л. Преобладающими солями являются NaCl + KCl (до 113,7 г/л), $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4$ (до 11,85 г/л) и CaSO_4 (до 4,32 г/л).

Приведенная краткая характеристика инженерно-геологических и гидрохимических условий участка инъекционных работ определяет специфические требования, которым должен удовлетворять химический тампонажный раствор для эффективного уплотнения пород в зоне защитного экрана, предварительно обработанных цементным раствором через инъекционные скважины I очереди. К числу таких требований, прежде всего, относятся низкая вязкость и высокая проникающая способность, что позволит затампонировать тонкие трещины шириной раскрытия менее 0,1 мм и крупные поры в породах; хорошая адгезия (сцепление) по отношению ко всем литологическим разностям пород, входящих в зону инъекции, учитывая их соленосность, карбонатность и гипсоносность; устойчивость раствора к разбавлению сильно минерализованными водами; устойчивость гелей в пресной воде и рассолах, содержащих хлориды и сульфаты; неагрессивность постинъекционных вод по отношению к соленосным породам и цементному камню.

Для выполнения этого требования в Проблемной лаборатории геологического факультета МГУ были опробованы практически все известные и применяемые на практике разновидности химических гелеобразующих растворов высокой проникающей способности. Исследования показали прежде всего, что высокое содержание в подземных водах района сульфатов сильно осложняет применение щелочных силикатных рецептур, так как наличие таких солей вызывает в периферийной части инъецируемого раствора выпадение хлопьевидного осадка и резкое снижение проницаемости золя.

Применение кислых рецептур, и в частности на основе карбамидных смол, ведет к интенсивному газовыделению, не позволяющему получить в пределах обрабатываемой зоны равномерного заполнения трещинно-пустотного пространства гелем закачиваемого раствора.

В итоге экспериментальных проработок определилась необходимость разработки новой рецептуры, позволяющей получить эффект уплотнения пород в конкретных инженерно-геологических условиях. За основу нового раствора, разработанного в проблемной лаборатории, взята алифатическая эпоксидная смола ТЭГ-1, представляющая собой сиропообразную жидкость от светло-желтого до коричневого цвета. Удельный вес смолы 1,14 г/см³. Смола хорошо растворима в воде.

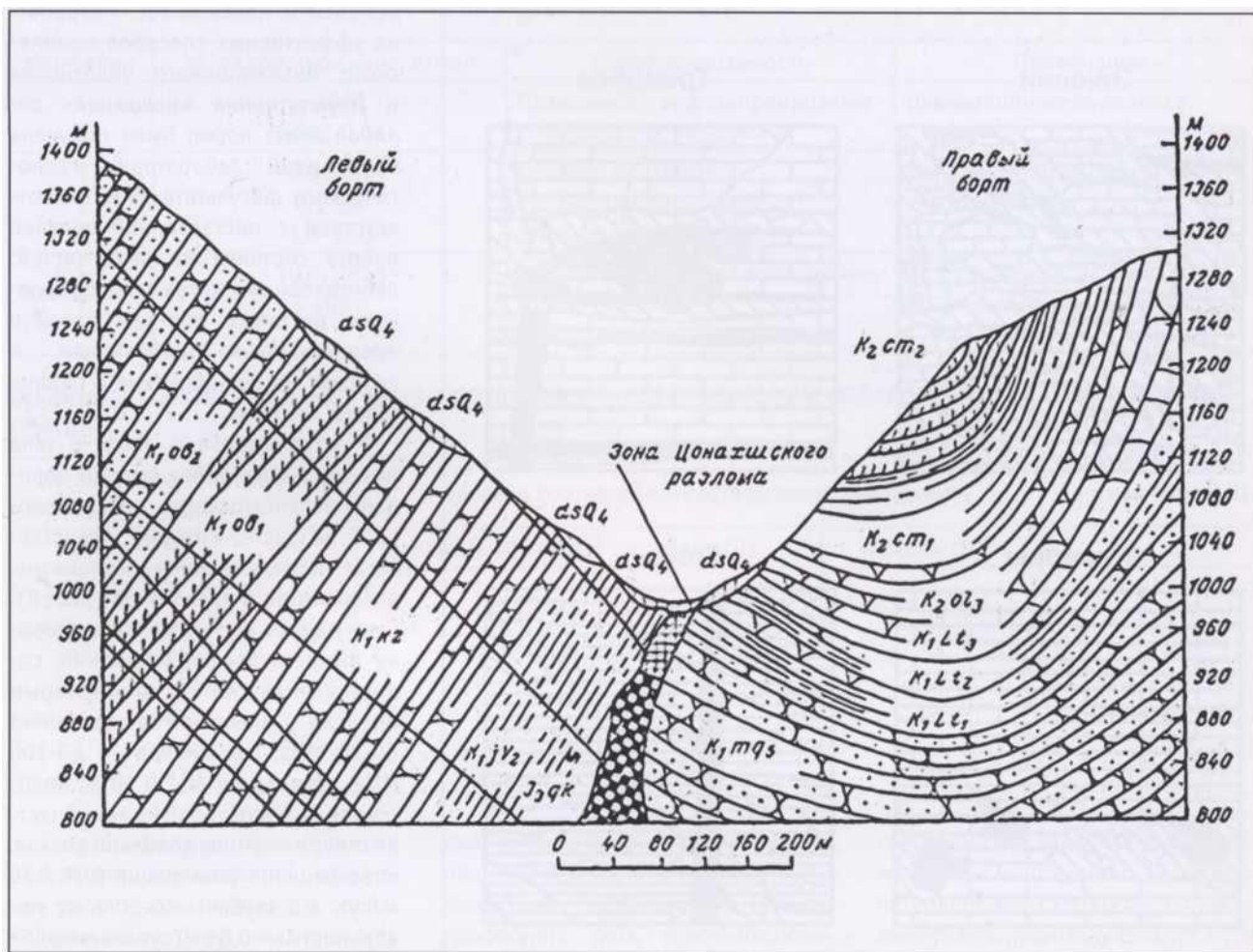


Рис. 2. Схематический геологический разрез долины р. Вахи в районе опытного участка № 1

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ РАСТВОРОМ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Интервал опробования, см	Прочность на одноосное сжатие, МПа			
	без предварительного водонасыщения		предварительно водонасыщенные	
	песчаник	аргиллит	песчаник	аргиллит
0-5	0,71-0,89	0,70-0,83	0,71-0,80	0,74-0,83
5-10	0,65-0,83	0,57-0,90	0,62-0,74	0,65-0,71
10-15	0,59-0,85	0,63-0,87	0,51-0,63	0,48-0,65
15-20	0,62-0,78	0,65-0,81	0,32-0,43	0,27-0,41

ТАБЛИЦА 4. УДЕЛЬНЫЕ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ЭПОКСИДНОГО РАСТВОРА В СКВАЖИНАХ ОПЫТНОГО УЧАСТКА

Скважины	Зоны инъекции							
	I-35-40 м		II-40-45 м		III-45-60 м		IV-50-57.6 м	
	л/мин	л/м	л/мин	л/м	л/мин	л/м	л/мин	л/м
15	0,082	23	0,001	20	0,042	23	0,057	32
16	0,107	39	0,038	35	0,058	23	0,017	27
13	0,022	16	0,037	16	0,015	25	0,031	16
12	0,016	10	0,017	22	0,013	14		

ТАБЛИЦА 5. УДЕЛЬНЫЕ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ В КОНТРОЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ ПОСЛЕ ХИМИЧЕСКОГО ДОУПЛОТНЕНИЯ

Скважины	Зоны инъекции			
	1-35-40 м	11-40-45 м	Ш-45-50 м	IV-50-55 м
К-2	0,0078	0,0029	0,0060	0,0101
К-3	0,0098	0,0062	0,0053	

Отверждение водных растворов смолы осуществлялось добавкой полиэтиленполиамиона. Гелеобразование происходит в результате присоединения аминогрупп к смоле с разрывом эпоксидного кольца. Различное соотношение смолы и полиэтиленполиамиона позволяет получить время гелеобразования от 0,5 до 2,5 часа. Соотношение смолы и воды составляет 1:3,5. Начальная вязкость растворов около 2 СПЗ. Лабораторные исследования показали, что данная рецептура дает положительный результат как при закреплении воздушно сухих карбонатосодержащих пород, так и при закреплении водонасыщенных образцов (табл. 3).

В опытах использовались фракции 0,5–1,0 мм песчаников и аргиллитов. Для водонасыщения использовалась вода с минерализацией 70 г/л, отобранная на створе Рогунской ГЭС. Прочность на одноосное сжатие определялась через 3 суток после закрепления.

Прочность закрепления фракций различных литологических разностей колеблется от 0,4 до 0,8 МПа. Ко всем литологическим разностям зоны инъекции гель обладает высокой адгезией: сцепление породы с гелем значительно выше структурного сцепления внутри геля.

Изучение возможности предварительного засоления рецептуры показало, что отрицательного воздействия не наблюдается. Вязкость раствора меняется незначительно. Возможность регулирования времени гелеобразования остается в тех же пределах.

Опробование эпоксидного раствора в производственных условиях проводилось на участке на левом берегу р. Вахш в четырех скважинах, расположенных в вершинах квадрата со стороной 2,0 м. Инъекция выполнялась нисходящими зонами длиной по 5,0 м, начиная с относительной глубины 35,0 м и до контакта с солью. Перед началом инъекции проводилось гидроопробование зоны водой, а вблизи контактов с солью насыщенным раствором соли.

Удельное водопоглощение до цементации изменялось в пределах от 0 до 0,52 л/мин. После проведения цементационных работ удельное водопоглощение на опытном участке снизилось до 0,013–0,107 л/мин, а максимальное значение не превышало 0,14 л/мин, что свидетельствует о наличии лишь тонкой трещиноватости в зоне инъекции после цементационных работ.

Инъекция эпоксидного раствора выполнялась в интервале 35–57,6 м. Всего было обработано 15 зон и закачено 1720 л раствора. Поглощение по зонам изменялось в пределах от 10 до 39 л/мин. Количество закаченного раствора в каждой зоне, а также исходные удельные водопоглощения по опытному участку показаны в табл. 4.

Пройденные контрольные скважины показали, что величина удельного водопоглощения пород изменяется от 0,0029 до 0,0101 л/ мин, т.е. пределы изменения водопоглощений снизились примерно в 10 раз (табл. 5).

Выполненные лабораторные исследования и производственные опыты показали, что, учитывая конкретные условия створа Рогунской ГЭС (слабая проницаемость осадочных пород, их карбонатность и засоленность, а также высокая минерализация подземных вод), для целей уплотнения и доуплотнения пород, вмещающих соляной пласт, можно использовать химический тампонажный раствор на основе водорастворимой эпоксидной смолы ТЭГ-1. Применение эпоксидного гелеобразующего раствора позволяет в 6–10 раз снизить водопроницаемость предварительно цементированных аргиллитов, алевроитов и песчаников.

ОСНОВНАЯ ИДЕЯ ПРОЕКТА

Автором проекта предложено значительно упростить технологию. Эпоксидная смола с отвердителем в определенном соотношении добавляется в цементный раствор. Цементный отжим, представляющий собой эпоксидную смолу, заполняет недоступные для цементации трещины (менее 0,1 мм) где происходит гелеобразование и резкое снижение проницаемости. Добавление эпоксидной смолы в цементный раствор не влияет на его свойства. В свою очередь добавление эпоксидной смолы в цементационный раствор практически не влияет на процесс гелеобразования и соответственно на тампонажный эффект. Экспериментальные работы показали высокий эффект предлагаемого метода. Для гидроизоляции стволов Декханабадского завода целесообразно провести инъекционное закрепление проблемных зон предлагаемым раствором. Соотношение компонентов в растворе, шаг скважин и другие технологические особенности конкретизируются после определения удельного водопоглощения пород и некоторых других свойств массива.

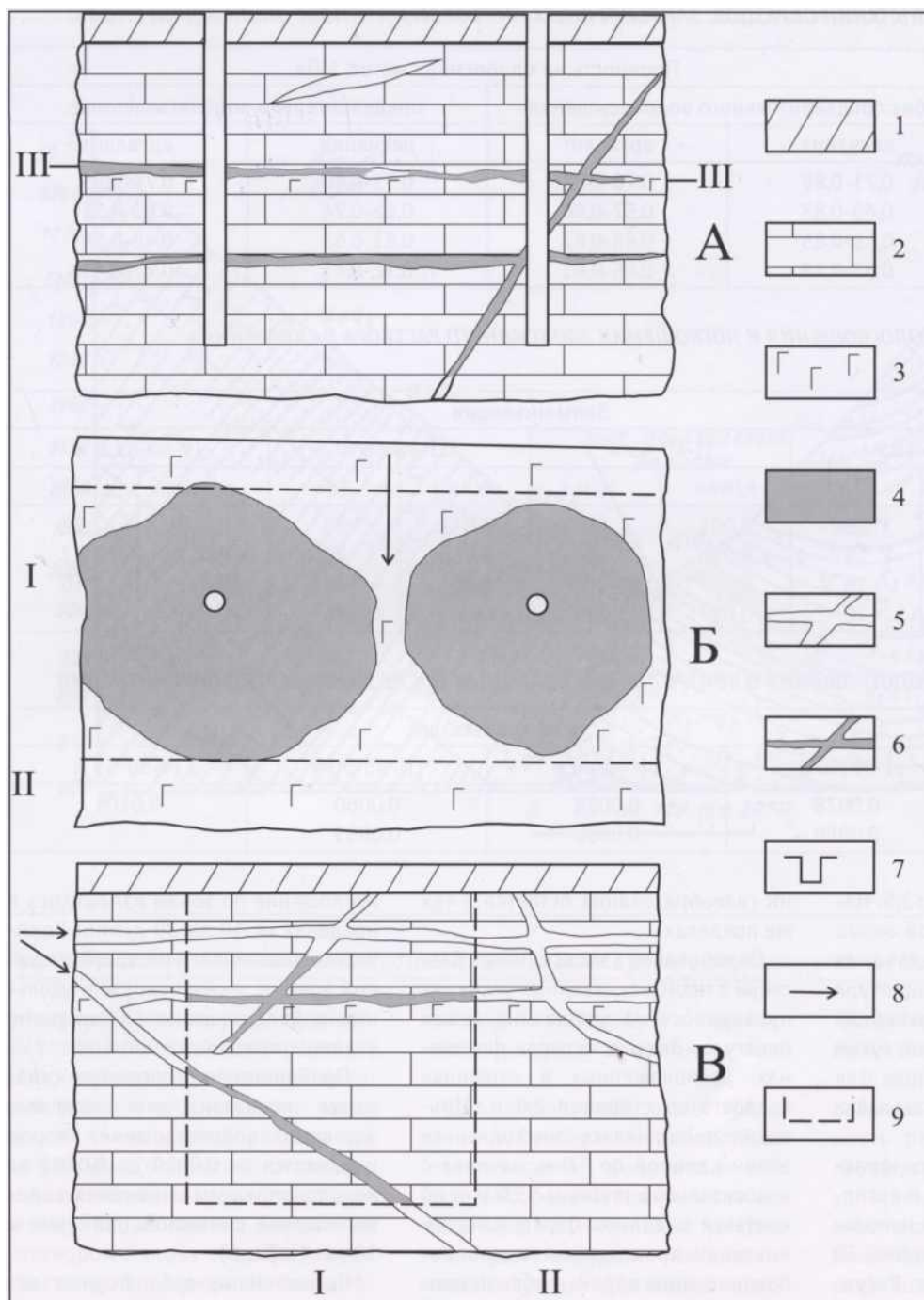


Рис. 3. Взаимодействие геля и подземных вод в районе противофильтрационной завесы.

Разрезы:

А - вдоль оси завесы,

В - поперек оси завесы;

Б - план (по линии III - III).

1 - бетон,

2 - карбонатные породы,

3 - гипс,

4 - гель; трещины:

5 - незаполненные гелем,

6 - заполненные гелем;

7 - инъекционные скважины,

8 - направление движения подземных вод,

9 - контур завесы,

I - тело завесы,

II - зона распространения
постинъекционных
растворов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воронкевич С.Д.** Основы технической мелиорации грунтов. М. Научный мир. 2005.
2. Опыт применений инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС // Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А., Ларионова Н. А., Сергеев В. И. и др. — Гидротехническое строительство. №10, 1981.