

УДК 621.039 (58:7)

DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.52

**ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
СВОЙСТВ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ  
ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ  
НА ПРИМЕРЕ ГЛИНОЗЕМИСТОГО  
БЕТОНА**

**INVESTIGATION OF SAFETY BARRIERS  
FILTRATION PROPERTIES  
FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL  
ON THE ALUMINA CONCRETE  
EXAMPLE**

М.А. Царев<sup>1,2</sup>, И.Ю. Лободенко<sup>1</sup>,  
А.А. Малофеев<sup>1</sup>, Н.Е. Ерёмина<sup>1</sup>,  
А. Б. Ермолинский<sup>2</sup>, М.С. Чернов<sup>2</sup>,  
Е.Н. Самарин<sup>2</sup>, А.П. Пензев<sup>2</sup>

Mikhail A. Tsarev<sup>1,2</sup>, Ivan Yu. Lobodenko<sup>1</sup>,  
Alexey A. Malofeev<sup>1</sup>, Nadezhda E. Eremina<sup>1</sup>,  
Andrey B. Ermolinsky<sup>2</sup>, Mikhail S Chernov<sup>2</sup>,  
Eugene N. Samarin<sup>2</sup>, Anton P. Penzev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), г. Москва, Россия; <sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
domikes@gmail.com

<sup>1</sup> Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia; <sup>2</sup> Faculty of Geology Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia  
domikes@gmail.com

**Аннотация.** Представленная работа – результат изучения фильтрационных свойств материалов инженерных барьеров безопасности для пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов 3 и 4 классов, а также оценки расчетного гидрогеологического моделирования нескольких пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов на соответствие отдельным положениям действующей нормативной документации в области использования атомной энергии. Поскольку состав применяемых материалов для инженерных барьеров безопасности различен, прогнозные расчеты времени деградации материалов с использованием термодинамических констант могут иметь высокую погрешность (300 % и более), а длительный контакт инженерных барьеров безопасности с природными водами или растворами хранилищ, может привести к изменению состава, пористости барьерного материала и, как следствие, к изменению фильтрационных, сорбционных, прочностных свойств и параметров инженерных барьеров безопасности, то подходы к изучению эволюции слабопроницаемых материалов барьеров, при различных инженерно-геологических условиях

**Abstract.** The presented work is the result of studying the filtration properties of engineering safety barriers materials for Class 3 and 4 near-surface radioactive waste disposal facility, as well as the assessment of computational hydrogeological modeling of several near-surface radioactive waste disposals for compliance with certain provisions of the current regulatory documentation in the field of atomic energy use. Since the composition of the materials used for barriers materials is different, predictive calculations of material degradation time using thermodynamic constants can have a high margin of error (300 % and more), and long-term contact of barriers materials with groundwaters or storage solutions can result in changes to the composition, porosity, and, consequently, the filtration, sorption, strength properties of the barrier material. Approaches to studying the evolution of weakly permeable barriers materials under varying engineering-geological conditions over the long-term application of barriers materials require further development. In the present work a methodical approach to long-term filtration experiments in barriers samples is proposed, on the example of cement stone modified with clay additive, the results of filtration flow rate data through the sample are

Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu., Malofeev A. A., Nadezhda E. E., Ermolinsky A. B., Chernov M. S., Samarin E. N., Penzev A. P. Investigation of safety barriers filtration properties for radioactive waste disposal on the alumina concrete example. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2024, vol. 6, iss. 1, pp. 52–75. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2024.6.1.52.

на период долгосрочного применения инженерных барьеров безопасности, требуют проработки.

Предложен методический подход к длительным фильтрационным опытам в образцах инженерных барьеров безопасности, на примере цементного камня, модифицированного добавкой глины, представлены результаты регистрации расхода фильтрации через образец, после чего выполнена оценка изменения состава образца и структуры его порового пространства.

Применена модель равновесного растворения для расчета обратной задачи – по времени растворения гидроксида кальция в образце на момент возросшего расхода фильтрации оценена потеря кальция в твердой фазе, с учетом чего выполнен прямой расчет – времени деградации барьера нужной толщины при скорости фильтрации возможной в условиях захоронения. Изменение свойств материалов в ИББ, показанное в настоящей работе согласуются с работами других исследователей, а подход может успешно применяться для изучения эволюции барьерных материалов – подтверждения срока службы инженерных барьеров безопасности и обоснования интенсивности выхода радионуклидов за их пределы. Работа демонстрирует методическую возможность оценки длительной устойчивости изолирующих свойств барьеров с учетом экспериментальных данных и моделирования кинетики растворения компонентов. Экспериментальные оценки являются основным источником информации в отношении обоснования срока службы барьеров безопасности.

**Ключевые слова:** эволюция барьерных материалов; внешние воздействия; противofильтрационный экран; противofильтрационная завеса; захоронение радиоактивных отходов; коэффициент фильтрации.

### Введение

При выборе материалов инженерных барьеров безопасности (ИББ) для исключения

presented, after which the changes in the sample composition and its pore space structure are evaluated. The present work shows an attempt to apply the equilibrium dissolution model to calculate the inverse problem – calcium loss in the solid phase is estimated by the dissolution time of calcium hydroxide at the moment of increased filtration flow rate, and then a direct calculation of the degradation time of the barrier of the required thickness at the filtration rate possible under burial conditions is performed. The change of properties in barriers shown in the present work agree with the works of researchers, the approach can be useful and can be applied to study the evolution of barrier materials to confirm the lifetime of barriers and justify the intensity of radionuclide release beyond their limits. The work demonstrates the methodological possibility of estimating the long-term stability of the insulating properties of barriers, considering experimental data and modeling of the kinetics of dissolution of components. Experimental evaluations are the main source of information regarding the justification of the service life of safety barriers.

**Keywords:** evolution of barrier materials; external influences; anti-filtration screen; anti-filtration curtain; disposal of radioactive waste; filtration coefficient.

выхода радионуклидов или загрязняющих веществ в геологическую среду, в том числе в подземные воды, необходимо подтверждение

устойчивости защитных свойств материалов ИББ для условий конкретного пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО) или объекта, содержащего загрязняющие вещества, учитывая максимально приближенные к инженерно-геологическому массиву условия. Необходимость учета устойчивости фильтрационных свойств в общем виде отражена в нормативной документации различного уровня<sup>1,2,3,4,5</sup>.

Обоснованный учет изменения фильтрационных и миграционных параметров не может быть произведен без экспериментального подтверждения. С нашей точки зрения, в период долгосрочной эксплуатации ИББ могут изменять свои свойства, несовершенство прогнозного гидрогеологического моделирования является следствием неопределенности в параметрах и факторах: не учтенной изменчивости во времени фильтрационных и сорбционных свойств ИББ, взаимодействия материалов с изменением их свойств, параметров внешних воздействий (влияния процессов природного и техногенного характера на материалы ИББ).

В условиях сжатых сроков, устанавливаемых на лабораторные испытания при проектировании ИББ, миграционные свойства зачастую оцениваются без фильтрации через материал, на образцах нарушенного сложения и неоптимальной плотности<sup>6</sup> [Царев, 2024]. Все это ускоряет проведение опытов, но завышает значения параметров сорбции, снижая консервативность прогнозных расчетов геомиграции. Изменение пористости в образце материала ИББ во времени определяет как фильтрационные параметры – коэффициент фильтрации ( $K_f$ ), коэффициент проницаемости ( $K_n$ ), гравитационную и упругую водоотдачу ( $\mu$ ), ( $\mu^*$ ), так и миграционные параметры –

коэффициенты распределения ( $K_d$ ) и диффузии ( $D$ ). Таким образом, изменение фильтрационных свойств может служить индикатором перераспределения пористости.

Долговечность бетона, используемого в качестве одного из ИББ, зависит от стойкости к внешним воздействиям его цементной матрицы и заполнителей, которые могут обладать различной устойчивостью к тем или иным воздействиям [Царев, 2024]. По результатам исследования [МАГАТЭ, 2016] известно, что фактор просачивания влаги в бетонную конструкцию запускает механизм выщелачивания и высолообразования, что приводит к повышению пористости и, как следствие, проницаемости материала. Потенциальными местами деградации в таком случае являются трещины и участки с высокой перколяцией влаги. Воздействие щелочей и сульфатов из почвы приводит к сульфатной коррозии, что в свою очередь определяет изменение объема и вызывает локальное растрескивание материала. Как показано в работе [Воронков, 2013], должное внимание следует уделить выбору заполнителей. Сочетание реакционной способности заполнителя с высоким уровнем влажности и воздействие щелочей влечет за собой набухание этого заполнителя, растрескивание материала и высолообразование [Воронков, 2013]. Скорость деградации бетона связана с процессами миграции газов и влаги через поры, микротрещины и границы раздела фаз цементного камня и заполнителей бетона, что повышает важность качества защитного слоя бетона, а также изоляционных материалов в решении задач обеспечения долговечности бетонных конструкций. Например, в щелочно-кремнеземной реакции (ASR), где реакционная среда – вода, продуктом реакции является гидрат силиката кальция или гидрат силиката

<sup>1</sup> НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».

<sup>2</sup> НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

<sup>3</sup> РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».

<sup>4</sup> СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.

<sup>5</sup> СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения.

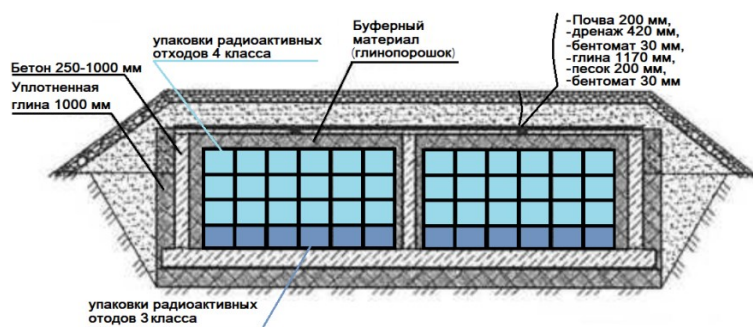
<sup>6</sup> ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности Г.

кальция/натрия [Dron, 1992]. Щелочи присутствуют в цементе в виде оксидов натрия и калия. Эти оксиды первоначально находятся в безводных фазах цемента, а затем растворяются в поровой жидкости в процессе гидратации до  $\text{Na}^+ + \text{OH}^-$  и  $\text{K}^+ + \text{OH}^-$ , образуя гидроксильные ионы натрия или калия соответственно. Поскольку эти ионы не являются составляющими процесса гидратации цемента, они накапливаются в поровом растворе, следовательно, сами щелочи не участвуют в реакции.

Возможное изменение свойств ИББ со временем заставляет задуматься о развитии подхода к изучению эволюции искусственно созданных барьеров безопасности (бетон отсеков ППЗРО и контейнеров, буферных материалов, глиняного экрана), при этом под «эволюцией» ИББ в геологическом массиве в этой работе понимается долговременное сохранение барьерами необходимых противодиффузионных и сорбционных свойств в заданный период времени. Можно сказать, что воздействия, изменяющие изолирующие свойства ИББ (сорбирующая способность, фильтрационное сопротивление) проявляются в течение длительного времени (например, растворение и замещение минералов, биологические процессы, ведущие к изменению пористости и активной поверхности) или же проявляются как условно кратковременные (например, воздействие опасных геологических

процессов таких как сеймотектонические, карстовые, склоновые). Отдельно можно выделить циклически проявляющиеся процессы, ведущие к изменению свойств ИББ (например, геокриологические процессы промерзания-оттаивания, возможные в верхней части ППЗРО). Таким образом, устойчивость изолирующих свойств ИББ зависит от его пространственного положения в геологическом массиве, времени, интенсивности и повторяемости воздействий природных и техногенных процессов, явлений и факторов. Вопросы о сроках службы ИББ рассматриваются в литературе [Jacques, 2013; Игин, 2022; Лаверов, 2008; Сорокин, 2022] и, по всей видимости, требуют уточнения для конкретных материалов.

Исследования, представленные в настоящей статье, выполнены на примере слабопроницаемого образца бетона на глиноземистом цементе с содержанием бентонитовой глины, в условиях ускоренной фильтрации с постоянным градиентом напора до момента фильтрационной деградации растворения образца, что проявилось в скачкообразном росте его проницаемости. С учетом результатов эксперимента на образце выполнена и расчетная оценка времени деградации фильтрационных свойств барьера для условий приближенным к реальным (при меньшей скорости фильтрации и большей толщине барьера).



**Рисунок 1.** Проектная конструкция отсеков ППЗРО (по материалам статьи [Анисимов, 2022])

**Figure 1.** The design of the compartments of the near-surface disposal of radioactive waste (based on the materials of the article [Anisimov, 2022])

Изучение изменения  $K_f$  и химического состава образца, позволило дать методические предложения к оценке эволюции изолирующих свойств материалов в массиве, а также создать

подход для решения актуальной практической задачи – выбора материала ИББ и технологии его применения с учетом влияния природных и техногенных процессов на изолирующие

свойства. В работе представлены: предложенный подход к оценке устойчивости изолирующих свойств ИББ на примере образца глиноземистого цементного камня и применяемое оборудование (в том числе созданное самостоятельно), основные результаты эксперимента, рекомендации и предложения по уточнению отдельных положений нормативных документов в области использования атомной энергии.

### Необходимые сроки службы ИББ

Требованиями федеральных норм и правил, а также положениями руководств по безопасности<sup>7,8,9</sup> (приложение № 3 к НП 055-14, п. 38 НП-069-14, пп. 47, 50, 52 РБ-117-16), показано, что необходимо обеспечить сохранение изолирующих свойств ИББ для обеспечения долговременной безопасности. Исполнение указанных требований невозможно без предварительно установленных сроков службы ИББ. Вопросы же сроков службы ИББ, неоднократно поднимались в публикациях и статьях, например в [Игин, 2022; Лаверов, 2008; Сорокин, 2022]. Сроки службы ИББ должны быть достаточными для снижения активности отходов при образовании продуктов деления, например в работе [Лаверов, 2008] отмечено, что контейнер для радиоактивных отходов (РАО) должен обеспечивать изоляцию от подземных вод на срок 1000 лет, это обосновано тем что <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs, обеспечивающие наибольший уровень радиоактивности в первые сотни лет, практически полностью распадутся, подобный подход может быть справедлив и для ППЗРО с отходами 3 и 4 класса.

В статье [Игин, 2022] рассмотрены сценарии последовательного выхода из строя ИББ, отмечено что изоляция РАО в ППЗРО обеспечивается следующими сроками службы: металлических контейнеров (30–50 лет), железобетонных контейнеров (300 лет), буферного порошка (300–500 лет), бетонных

сооружений (100 лет), глиняного экрана (300–500 лет), покрывающего экрана и гидроизолирующего экрана с дренажным и почвенным слоем (300–500 лет).

Так как ИББ должны сохранять изолирующие свойства в период потенциальной опасности захороненных РАО, именно этот срок определяет выбор материала для создания ИББ в условиях его использования. Прогнозные гидрогеологические расчеты выхода загрязнения за пределы ИББ невозможны без понимания срока наступления такого события и активности в источнике на момент его наступления. Возможность деградации материала ИББ (в отдельных случаях и скорость такого процесса) может быть оценена консервативно для конкретных условий.

### Пространственное положение ИББ в массиве

ППЗРО предполагают создание многобарьерной системы (рисунок 1). Каждый барьер сооружается различным способом: природную глину уплотняют в котловане, после чего выполняется заливка бетона, а после загрузки отсеков контейнерами пустоты между ними засыпаются сорбирующей порошковой глиной. Исследования долговечности бетона, как указано в работе [Сорокин, 2022], показывают, что современные технологии позволяют изготавливать его для строительства ответственных зданий и сооружений со сроком эксплуатации до 500 лет, но при этом требуется разработка методического подхода к обоснованию надежности конструкционных материалов (в частности контейнеров для РАО).

Барьеры сооружаются из комбинаций материалов, которые необходимо подбирать так, чтобы сохранялись их сорбирующие и противотрационные свойства, в этом состоит работа инженерного барьера, обеспечивающая долговременную безопасность.

<sup>7</sup> НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности».

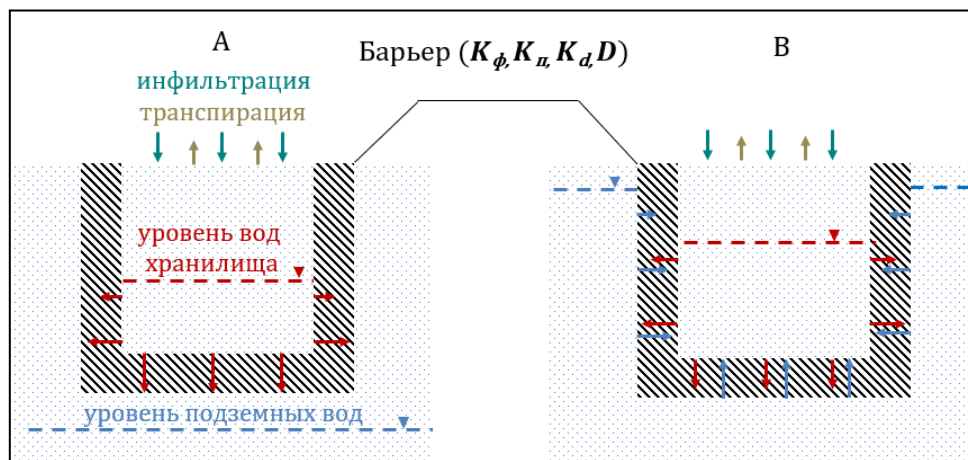
<sup>8</sup> НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

<sup>9</sup> РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов».

Физико-химическое преобразование компонентов барьерного материала в конкретных условиях должно изучаться с учетом следующих условий: давления, химического состава, температуры и скорости фильтрации. В условиях фильтрации воды через барьер не должна снижаться его прочность и устойчивость. Оценка конкретных сроков службы материала усложнена, так как имеют место следующие проблемы: отсутствие методического подхода к изучению стабильности изолирующих свойств, сложность выбора и обеспечения условий для оценки фильтрационных и миграционных параметров материала, необходимость учета постоянно действующих, циклических или единовременных воздействий. Например, барьерные материалы в течение срока их службы насыщаются водой постепенно, при этом в работе [Иванов, 1994] показано, что коэффициенты диффузии зависят от влажности, что имеет значение для оценки барьерных свойств как в отношении миграции, так и относительно

процессов деградации барьерного материала. Другой пример – воздействие геокриологических процессов.

Пространственное положение ИББ в массиве определяет направление процессов изменения свойств ИББ за длительный период эксплуатации, оно должно учитываться как особенность конкретного ППЗРО. Механизмы деградации бетона с использованием метода ускоренной карбонизации бетона рассмотрены в статье [Medvedev, 2024], где отмечается влияние на деградацию бетона щелочей, кислот, сульфатов и других веществ. По всей видимости, подход к оценке противофильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов и материалов ИББ должен учитывать, что на барьерный материал могут воздействовать как растворы внутренней части ППЗРО, так и природные воды (рисунок 2), при этом принципиально возможна разгрузка из сооружения в водоносный горизонт (рисунок 2А) или подтопление сооружения подземными водами (рисунок 2В).

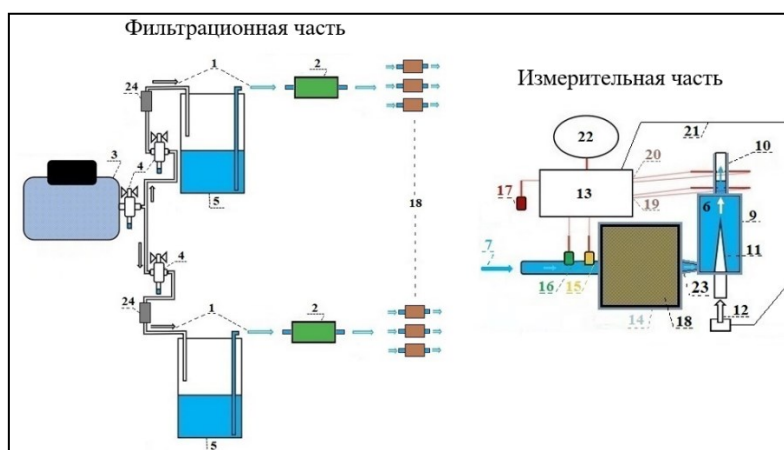


**Рисунок 2.** Фильтрационные схемы подтопления инженерных барьеров безопасности: А – в условиях фильтрации из сооружения в водоносный горизонт; В – в условиях насыщения из водоносного горизонта внутренней части сооружения (схема М.А. Царева)

**Figure 2.** Filtration schemes of engineering safety barriers flooding: А – under the condition of filtration from the structure into the aquifer; В – under conditions of saturation from the aquifer in the interior of the structure (scheme by М.А. Tsarev)

Миграция загрязнения в подземные воды из хранилища отходов с потоком фильтрующейся воды возможна при возникновении гидравлической связи подземных вод и растворов в пределах ИББ. С нашей точки зрения, ухудшение изолирующих свойств материала будет зависеть от изменения его пористости (при

изменении состава и структуры материала). При этом такой процесс зависит от начального состава и структуры образца, напряженно-деформированного состояния в барьере, температурных условий, а также поступления воды определенного состава.



**Рисунок 3.** Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов: 1 – подача воздуха и воды постоянного давления; температурный регулятор; 3, 12 – компрессор; 4 – регулятор давления воздуха со сборником конденсата; 5 – колба с водой (раствором) заданного давления и температуры; 6 – автоматический расходомер сверхмалых потоков; 7 – источник подачи воды (водопровод, колба); 8 – регулятор давления воды; 9 – приемная камера расходомера; 10 – измерительная трубка; 11 – продувочный клапан; 13 – плата с контроллером; 14 – термоизоляция; 15 – датчик температуры раствора; 16 – датчик давления раствора; 17 – датчик атмосферного давления и температуры; 18 – герметичная емкость с образцом; 19, 20 – вход первой и второй пар электродов через потенциометрический датчик; 21 – управляемое питание малогабаритного компрессора; 22 – персональный компьютер или дисплей с модулем памяти; 23 – вход для подвода фильтрата; 24 – обратный клапан (схема М.А. Царева, Патент РФ № 2819962<sup>10</sup>)

**Figure 3.** Automated complex for filtration and migration tests in samples of weakly permeable materials: 1 – constant pressure air and water supply; temperature regulator; 3, 12 – compressor; 4 – air pressure regulator with condensate collector; 5 – flask with water (solution) of a given pressure and temperature; 6 – automatic ultra-low flow meter; 7 - water supply source (water supply, flask); 8 – water pressure regulator; 9 – flow meter intake chamber; 10 – measuring tube; 11 – purge valve; 13 – board with controller; 14 – thermal insulation; 15 – solution temperature sensor; 16 – solution pressure sensor; 17 – atmospheric pressure and temperature sensor; 18 – sealed container with the test sample; 19, 20 – input of the first and second pairs of electrodes through a potentiometric sensor; 21 – controlled power supply of a small compressor; 22 – personal computer or display with memory module; 23 – inlet for filtrate supply; 24 – check valve (Scheme by M.A. Tsarev, Patent No. 2819962<sup>10</sup>)

### Разработка автоматизированного комплекса для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов

Для изучения изолирующих свойств барьеров разработан, опробован и запатентован<sup>10,11</sup> [Царев, 2022] фильтрационный

комплекс, показанный на рисунках 3 и 4, работа которого учитывает известные способы исследования фильтрационных свойств слабопроницаемых грунтов и бетонов<sup>12,13</sup> [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988]. Комплекс имеет регулируемую подачу жидкости пневматическим способом и снабжён цифровыми датчиками температуры и давления, значения с

<sup>10</sup> Царев М. А., Лободенко И.Ю., Патент РФ № 2819962, 28.05.2024. «Автоматизированный комплекс для проведения фильтрационных и миграционных испытаний образцов пористых материалов».

<sup>11</sup> Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».

<sup>12</sup> ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

<sup>13</sup> Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

которых используются для расчета проницаемости и автоматически считываются при регистрации расхода разработанным расходомером<sup>14</sup>, что позволяет одновременно производить опыт на большом количестве образцов, для которых при этом можно задавать разный состав жидкости и её температуру.

Элементы фильтрационного комплекса могут выполняться из различных химически

нейтральных полимерных материалов, что позволяет предотвратить на контакте с ними возможные химические реакции, изменение состава жидкости, образование коррозии [Царев, 2024] на контакте с образцом. Фото фильтрационного комплекса представлено на рисунке 4.



Рисунок 4. Автоматизированный комплекс для фильтрационных и миграционных испытаний в образцах слабопроницаемых материалов (фото М.А. Царева)

Figure 4. Automated complex for filtration and migration tests in samples of weakly permeable materials (photo by M.A. Tsarev)

Расходомер установки работает кондуктометрическим способом, одновременно контролирует снятие замеров со всех датчиков и имеет простую конструкцию (рисунок 5): на вход перед расходомером под цифрой (1) приходит фильтрат из испытуемого образца и удаляется через трубку (3), замыкая поочередно инертные электроды (4) и (5), соединенные с контроллером (6), регистрирующим время прохождения жидкости в трубке известного объема.

При замыкании верхней пары электродов (5) производится запись расхода фильтрации и считывание информации со всех датчиков установки, вместе с этим включается продувка

измерительной трубки небольшим компрессором (8) через клапан (9) для удаления жидкости из трубки и повторения цикла измерений.

Диаметр трубки и расстояние между электродами можно менять, для опыта была использована трубка диаметром 2 мм с сантиметровым расстоянием между парами электродов. Регистрируемый ею расход за час составляет до 0,0001 см<sup>3</sup>/мин.. Учет температуры воды, воздуха, давления раствора на входе в образец и атмосферное давление производится датчиками (5)–(17), представленными на рисунке 3, результаты измерений могут быть представлены в графическом виде (рисунок 6).

<sup>14</sup> Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».

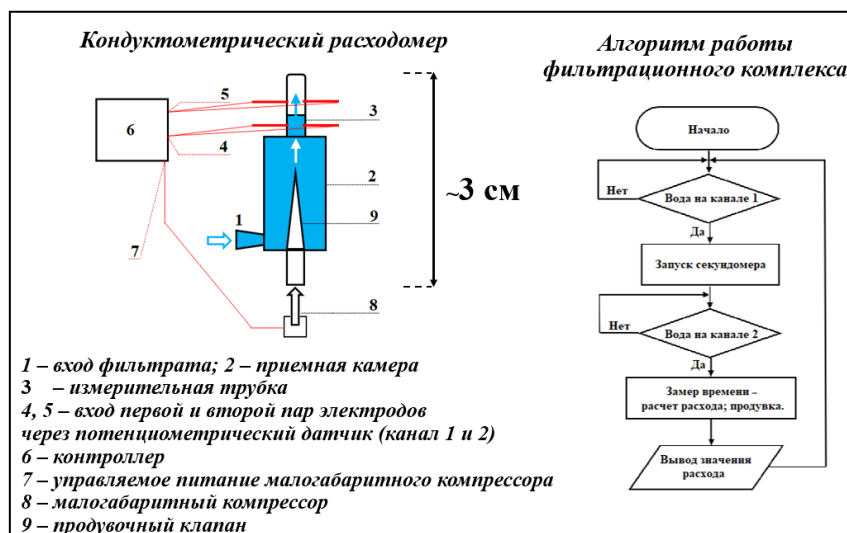


Рисунок 5. Схема работы фильтрационного комплекса с кондуктометрическим расходомером, Патент РФ №2803394<sup>15</sup>

Figure 5. The scheme of operation of the filtration complex with a conductometric flow meter, Patent No. 2803394<sup>16</sup>

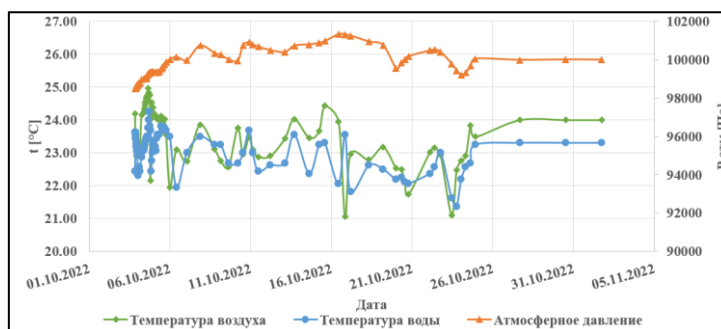


Рисунок 6. Пример регистрации температуры и атмосферного давления для оценки проницаемости (по данным М.А. Царева)

Figure 6. Example of temperature and atmospheric pressure registration for permeability assessment (according to the data by M.A. Tsarev)

При выполнении измерений по показаниям температуры может быть введена поправка для значений  $K_f$ , приведенного к температуре 10 °С, требуемая в соответствии с ГОСТ 25584-2016 (Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации)<sup>16</sup>. Поправка вводится для сравнения значений  $K_f$  исследуемого образца за длительный период, когда расходы фильтрации сняты при разной температуре. Для точных исследований влияния минерализации и температуры используется характеристика фильтрационного сопротивления –  $K_n$  [Д] (Дарси),

учитывающая вклад динамической вязкости  $\eta$  [сП], при этом кинематическая вязкость  $\nu$  [мм<sup>2</sup>/с] изучается на вискозиметре при нужной температуре согласно ГОСТ 33768–2015 (Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей)<sup>17</sup>.

#### Подход к оценке устойчивости изолирующих свойств ИББ на примере образца глиноземистого цементного камня

Долговременная изолирующая способность инженерного барьера обеспечивается как

<sup>15</sup> Царев М. А., Патент РФ № 2803394, 12.09.2023 «Расходомер сверхмалых потоков».

<sup>16</sup> ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».

<sup>17</sup> ГОСТ 33768-2015. «Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей».

противофильтрационными, так и сорбирующими свойствами, поэтому независимо от изменений в самом материале эти характеристики барьера должны быть обеспечены на приемлемом уровне в период максимальной активности отходов, исключая выход загрязнения в подземные воды.

В статье Бельгийского центра ядерных исследований [Jacques, 2013] обсуждалась химическая деградация бетона при его выщелачивании атмосферными и грунтовыми водами. Представлены модели химического разложения бетона при фильтрационном выщелачивании с выносом кальция из зоны растворения, а также численный пример применения модели такого разрушения к крупномасштабным бетонным конструкциям. Используемая в [Jacques, 2013] модель описывает взаимные изменения пористости, проницаемости, проводимости и извилистости, вызванные геохимическими реакциями и процессами (минералогическими изменениями). Задаваемая авторами пористость и параметры массопереноса анализируются совместно на предмет чувствительности к изменению скорости деградации. Уравнения термодинамического моделирования выщелачивания кальция реализованы в универсальном симуляторе COMSOL Multiphysics, а результаты моделирования применены к крупномасштабным бетонным конструкциям. В численном примере, приведенном в [Jacques, 2013] задана бетонная конструкция с различной сетью трещин (варианты с низкой и высокой плотностью), расход воды определяется граничными условиями постоянного давления сверху и снизу, предполагается, что переход от низкой к высокой плотности трещин происходит приблизительно через 350 лет. В исследовании [Jacques, 2013] отмечено, что общая водопроницаемость является одним из наиболее важных факторов при рассмотрении деградации бетона, поэтому это свойство указывается как показатель общей деградации, другим показателем степени деградации бетона является общее количество Са, при этом увеличение сети трещин зависит от исходной гидравлической проводимости матрицы, количества проходящих трещин. Таким образом на модели [Jacques, 2013], реализованной в программном комплексе COMSOL, выполнен

расчет увеличения потока воды через бетонный блок в результате выщелачивания кальция с автоматическим обновлением гидравлических и транспортных свойств в зависимости от состояния деградации, для оценки влияния физических (поток) и химических (перенос) изменений на миграцию радионуклидов. Рассчитанное растворение минералов кальция в бетоне привело к увеличению пористости и, следовательно, к увеличению гидравлической проводимости, поток воды через бетонный блок увеличился почти на два порядка, моделирование показало неоднородный характер процесса выщелачивания кальция.

Результаты работы, описанные в настоящей статье, согласуются с изложенными в статье [Jacques, 2013] позициями о том, что:

- при выщелачивании компонентов материала на основе бетона имеет место обновление фильтрационных и миграционных свойств в результате увеличения пористости (геохимическая эволюция);

- геохимическая деградация бетона зависит от состава просачивающейся внешней воды;

- степень химической деградации изучается с точки зрения изменения водопроницаемости, которая рассматривается как один из важнейших показателей общей деградации вместе с общим количеством Са;

- увеличение сети трещин зависит от исходной проводимости, количества трещин;

- время в течение которого происходит увеличение проводимости, в значительной степени зависит от баланса массы Са, от его содержания в твердом виде зависят все переменные физические параметры;

- разрушение бетона реализовано на термодинамической модели выщелачивания кальция: его концентрация в жидкой фазе остается постоянной в соответствии с пределом растворимости, для описания соотношения кальция между жидкой и твердой фазами использовано равновесное растворение (без учета кинетики).

Решения [Jacques, 2013] хотя и отражают основные химические процессы разложения бетона, обеспечивая действительно эффективный инструмент для оценки эволюции физических и химических свойств материала, но являются при

этом упрощенной численной синтетической моделью химического разложения материала (в этом случае бетона), где пористость и извилистость задаются вручную и могут не соответствовать реальному материалу. Это же относится к чувствительности скорости химической деградации бетона к составу воды, которая оценивается в статье [Jacques, 2013] путем многократных симуляций.

Предлагаемый в настоящей статье подход также заключается в том, что пористость материала определяет фильтрационные  $K_f$ ,  $K_n$  и емкостные параметры  $\mu$ ,  $\mu^*$ , поэтому изменение фильтрационного сопротивления образца, зависящее от пористости материала, можно рассчитать по изменению расхода фильтрации через образец. Таким образом возможно оценить пороговое значение пористости, при котором расход фильтрации через барьер, предположительно, начинает резко возрастать в данных условиях фильтрации (при определенном составе образца и фильтрата, при заданной скорости фильтрации), подход с изучением взаимного изменения пористости, проницаемости, проводимости и извилистости в целом использован и авторами [Jacques, 2013] на синтетической модели.

Предлагаемый в настоящей работе подход обеспечивается длительным фильтрационным испытанием образца барьерного материала с постоянным градиентом фильтрации, в ходе такого испытания активная пористость может

изменяться. В качестве примера взят образец глиноземистого цементного камня, активная пористость в ходе испытания сначала уменьшалась (в результате гидролиза и перекристаллизации), затем увеличивалась (за счет процессов растворения). С применением оборудования собственной разработки, получившего государственную охрану и проиллюстрированного на рисунках 3–5, в эксперименте с увеличенной скоростью фильтрации через образец глиноземистого цементного камня, показанного на рисунке 7, было зарегистрировано по значениям расхода изменение противифильтрационных свойств со временем, показанное на рисунке 8.

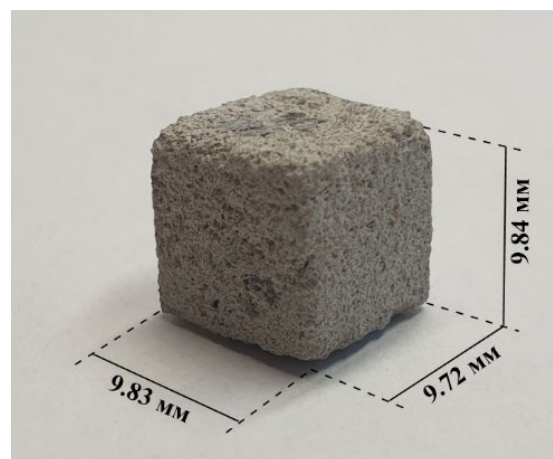


Рисунок 7. Образец глиноземистого цементного камня для пробного опыта

Figure 7. Sample of alumina cement stone for trial experience

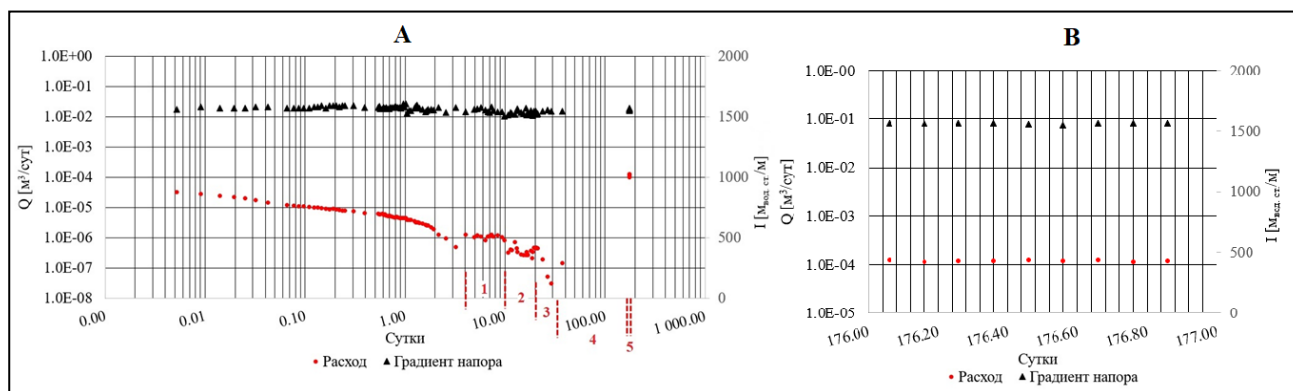


Рисунок 8. Фильтрационный опыт на образце глиноземистого цементного камня на разработанном фильтрационном комплексе с автоматической записью данных: А – логарифмический масштаб времени; В – замеры на завершающем этапе

Figure 8. Filtration experiment on a sample of alumina cement stone on a developed filtration complex with automatic data recording: A – logarithmic time scale; B – measurements at the final filtration stage

Исследуемый образец состоял из мелкозернистого песка (40 % образца), глинозема и оксида кальция, пяти процентов Mg–Na бентонитовой глины (в составе которой преобладает смектит и кремнезем).

Значение  $K_f$  оценено согласно основному закону фильтрации Дарси, первая стабилизация расхода дала значение порядка  $8 \cdot 10^{-6}$  м/сут при скорости фильтрации 1 см/сут, на десятые сутки расход упал, предположительно в связи с набуханием или коагуляцией в порах, затем последовала стабилизация с меньшей в 2,5 раза скоростью и проницаемостью, после этого через 30 суток наступила полная остановка

фильтрации, поэтому на 38-е сутки замеры были прекращены, но само фильтрационное испытание не прерывалось. При обработке результатов, в дальнейшем, отмечен замер расхода на 37-е сутки, который позволяет судить о том, что фильтрация всё же плавно возобновилась после остановки, при этом скорость фильтрации стабилизировалась на значении 120 см/сут, что позднее уже регистрировалось (по замерам в период 176–177 суток). Таким образом, коэффициент фильтрации образца барьерного материала и скорость фильтрации возросли на два порядка. Результаты фильтрационного опыта представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Результаты фильтрационного опыта на глиноземистом цементном камне

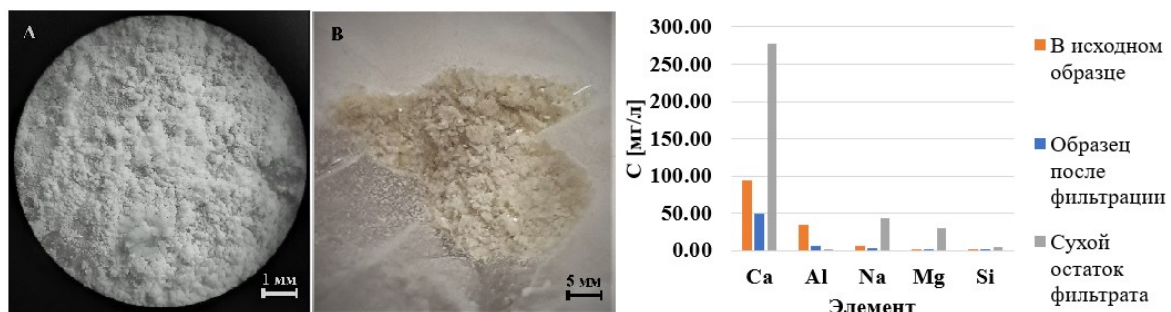
**Table 1.** Results of filtration experiment on aluminous cement stone

Время от начала фильтрации t, сут	$V$ , м/сут	$K_f$ , м/сут	Режим фильтрации
4–10 (1)	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	стационарный
10–20 (2)	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	стационарный
20–37 (3)	$< 10^{-4}$	$< 10^{-7}$	остановка
37–176 (4)	$< 10^{-7} - 1,2$	$< 10^{-7} - 7,9 \cdot 10^{-4}$	рост скорости
176–177 (5)	1,2	$7,9 \cdot 10^{-4}$	стационарный

#### Анализ изменения химического состава

После фильтрационного опыта, длительностью в полгода, на торце образца со стороны выхода фильтрата отмечены отложения серого оттенка (рисунок 9А). Сухой остаток, образовавшийся при испарении порции самого фильтрата, отобранной на завершающем этапе, имел желтовато-белый цвет (рисунок 9В). Три разные порции мелкодисперсного порошка (из

фильтрата, образца после фильтрации, исходного образца) одновременно выдержаны в деионизированной воде, эти пробы жидкости исследованы на масс-спектрометре, результаты представлены на диаграмме (рисунок 9). В каждом образце раствора вытяжки содержание Fe, Cu, Ti, Mn оказалось незначительным (менее 0,25 мг/л), при этом преобладает содержание кальция.



**Рисунок 9.** Результаты исследования преобладающих катионов в образцах и фото кристаллических продуктов выщелачивания из образца: а – на торце образца; б – из сухого остатка из жидкости фильтрата [Царев, 2023а, 2023б, 2023с]

**Figure 9.** The results of the predominant cations study in the samples and photos of crystalline leaching products from the sample: а – at the end of the sample; б – from the dry residue from the filtrate liquid [Tsarev, 2023a, 2023b, 2023c]

Параллельно с фильтрационным опытом выполнен и дифференциально-термический анализ (ДТА) исходного образца и образца, отделенного от исходного и прошедшего замачивание до полного водонасыщения (в безнапорных условиях). Такое исследование показывает изменение преобладающих веществ в цементном камне при его взаимодействии с водой в статических (без водообмена) условиях. В ходе ДТА при повышении температуры в

интервале 90–140 °С в образце происходит выход свободной межслоевой воды из частиц материала. Температура разложения гидроксида алюминия представлена на графике пиком 230 °С. При 575 °С имеющийся в образце песок дает термический эффект при переходе в альфа-кварц, а при 760 °С начинается разложение кальцита. Количественные параметры по обоим образцам представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Результаты дифференциально термического анализа (ДТА)

**Table 2.** Results of differential thermal analysis (DTA)

Образец	Потери массы, %			
	Ca(OH) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O 90–130 °С	Al(OH) <sub>3</sub> 200–230 °С	CaCO <sub>3</sub> 760–950 °С	Суммарные при нагреве до 1000 °С
До испытаний	0,43	5,04	3,61	17,23
После испытаний	0,71	5,71	5,53	17,03

Был выполнен термогравиметрический анализ, результат которого представлен в таблице 3 и показал, что за время выдержки в воде образца с идентичным составом наблюдается изменение минералогического

состава образца: происходит увеличение содержания карбоната кальция и алюминатов щелочных металлов. Это подтверждает наличие протекающей коррозии в образце.

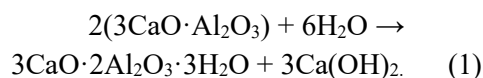
**Таблица 3.** Результаты термогравиметрического анализа

**Table 3.** Results of thermogravimetric analysis

Образец	Исходное содержание, %		
	Ca(OH) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O	Al(OH) <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
До испытаний	1,75	14,56	8,20
После испытаний	2,89	16,49	12,57

Следует отметить, что термогравиметрический и дифференциально-термический анализы важны для исследований деградации материалов ИББ, в том числе при оценке воздействия на материалы ИББ повышенных температур.

Основным процессом, уменьшающим фильтрационное сопротивление образца вследствие роста его пористости, предположительно, является коррозия выщелачивания. Начальные этапы фильтрационного опыта с увеличением фильтрационного сопротивления, предположительно, сопровождаются гидролизом минералов цементного камня с образованием извести, при этом концентрация Ca(OH)<sub>2</sub> в поступающей воде мала:



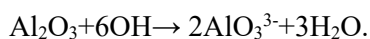
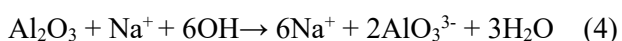
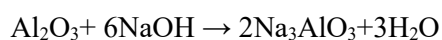
Таким образом, образовавшаяся известь Ca(OH)<sub>2</sub> реагирует растворенными в воде анионами CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, с образованием карбоната кальция CaCO<sub>3</sub> и молекулы воды:



Затем в процессе фильтрационного опыта наступает этап уменьшения фильтрационного сопротивления, вероятной причиной этому служит то, что вода растворяет гидроксид кальция, который далее вымывается из образца и вступает в реакцию с углекислым газом:



Сухой остаток, показанный на рисунке 9, не содержит алюминий в значительном количестве. Содержание алюминия в исходном образце в разы больше, чем в образце, подвергшемся долговременной фильтрации, предположительно, алюминий вымывался из образца на начальных этапах фильтрации (сбор фильтрата шел с 37-х суток после возросшей скорости фильтрации) согласно реакциям:



Указанное предположение согласуется и с концентрациями натрия в исследованных образцах.

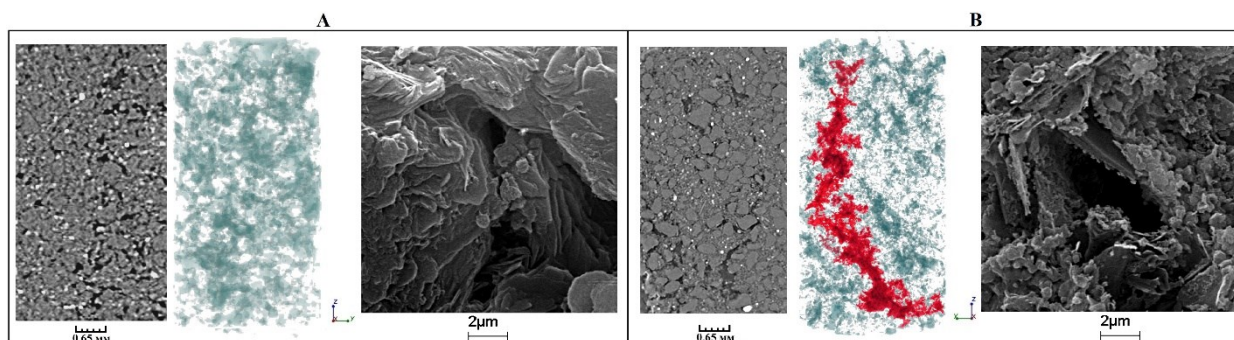
#### Изучение изменения структуры порового пространства глиноземистого бетона при воздействии длительной фильтрации методами томографии и электронной микроскопии

Для изучения порового пространства использован образец инженерного барьера безопасности на основе глиноземистого бетона, разделенный на образец № 1 (не подвергшийся фильтрационному испытанию), и образец № 2 (после 177 суток непрерывного фильтрационного испытания). Целью исследования является изучение изменения структуры и морфологии порового пространства барьерных материалов после испытаний на различные виды воздействий и использование результатов исследований для

обоснования долговременной устойчивости изолирующих свойств материалов, используемых при изоляции РАО. Задача исследования состояла в изучении морфологии пор и структуры порового пространства методами компьютерной томографии (КТ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Продемонстрирована применимость комплексного сравнительного анализа изменений в структуре порового пространства и в морфологии пор барьерных материалов до и после фильтрационных испытаний.

*Изучение структуры образцов методом компьютерной томографии.* Исследование структуры образцов №№ 1 и 2 выполнено с помощью компьютерного рентгеновского томографа (КТ). На рисунке 10 последовательно представлены: КТ-изображение, модель распределения пор по результатам КТ, а также морфология порового пространства образцов по данным СЭМ.

Результаты исследований показали, что образцы №№ 1 и 2 на начало исследований имели структуру, соответствующую моменту создания исходного образца, а воздействие фильтрующейся воды через материал (образец №2) изменило его строение. При сравнении результатов томографии в образце после фильтрации, показанном на рисунке 10В, наблюдается более высокая контрастность между зернами кварцевого песка и межзерновым пространством, пространством цемента – заполнителя относительно исходного образца (рисунок 10А), что может говорить о частичном разуплотнении межзернового порового пространства в результате его растворения или замещения менее плотным веществом.



**Рисунок 10.** Структура образцов по данным КТ и СЭМ: А – образец № 1; Б – образец № 2  
**Figure 10.** Structure of samples according to CT and SEM data: A – sample № 1; B – sample № 2

В образце №2 после фильтрационного испытания выражен канал (рисунок 10B), при этом образцы №№ 1 и 2 по данным КТ мало отличаются по пористости: изучение структуры образца № 1 (контрольный образец), не подвергшийся фильтрационному испытанию, показало, что он имеет пористость от 6 % до 10 %, а образец № 2 после фильтрационного испытания имеет среднюю пористость 5 %.

*Изучение морфологии порового пространства методом электронной микроскопии.* Исследование выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Изучению подверглись оба образца №№ 1 и 2. В образце бетона, через поровое пространство которого фильтровалась вода, наблюдаются изменения как морфологии отдельных пор, так и структуры порового пространства в целом. Результаты съемок (микроскопии) сколов двух образцов приведены на рисунке 10.

Результаты СЭМ показали, что крупные поры контрольного образца № 1 (рисунок 10А) заполнены мелкими чешуйчатыми частицами и микроагрегатами из них, при этом в структуре образца после фильтрационного испытания наблюдаются открытые крупные поры, что говорит о постепенном расширении капиллярной пористости в процессе фильтрационного опыта. Микроструктура образца №2, прошедшего испытания, в сравнении с контрольным образцом, по-видимому, представляет собой объемный выход продуктов реакции выщелачивания, который характеризуется слипшимися частицами  $\text{CaCO}_3$ . Исследования выполнены с применением оборудования КТ и СЭМ геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета (СЭМ LEO 1450VP, Германия, КТ Yamato TDM 1000H-II, Япония).

Рост значения  $K_f$  в ходе опытной фильтрации от значений порядка  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  м/сут может быть связан с растворением 12 % Са в цементе. По-видимому, увеличение пористости в процессе фильтрационного опыта действительно связано с увеличением тонких капилляров цемента, заполняющего межзерновое пространство, что приводит к скачкообразному

уменьшению фильтрационного сопротивления в момент возникновения гидравлической связи между капиллярами и крупными порами (размер которых по данным томографии изменяется незначительно).

### Пример расчета растворения в образце

Расчетная оценка скорости растворения выполнена согласно простейшей модели равновесного растворения в потоке воды [Румынин, 2020], основанной на балансе концентраций твердой фазы и раствора в порах зоны полного растворения и за фронтом растворения, при поршневом вытеснении раствора, при этом растворимым соединением кальция при выщелачивании цементного камня принято наиболее растворимое соединение  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Результат расчета по такой модели позволяет оценить скорость растворения по величине равновесия на фронте растворения ( $\Delta n$ ) равной отношению концентрации кальция в твердой фазе к концентрации кальция в растворе (аналогично составляющей эффективной пористости  $n_s = n + \Delta n$ ). Так как скорость растворения образца к моменту возросшего расхода фильтрации известна, произведен обратный расчет баланса концентраций кальция в твердой фазе и растворе для оценки содержания кальция в твердой фазе в момент роста расхода фильтрации. Согласно модели [Румынин, 2020], для расчета скорости растворения необходимо рассчитать концентрацию ионов раствора в зоне, подвергшейся растворению из системы уравнений (5).

$$\begin{cases} C_{\text{Ca}} \cdot C_{\text{OH}}^2 = K_{\text{пр}} \\ z_{\text{Ca}} \cdot C_{\text{Ca}} = z_{\text{OH}} \cdot C_{\text{OH}} + z_{\text{Cl}} \cdot C_{\text{Cl}} \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение в системе (1) представляет равновесную концентрацию растворения, а второе – условие электронейтральности раствора,  $K_{\text{пр}}$  – концентрационная константа равновесия диссоциации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $K_{\text{пр}} = \frac{PP}{\gamma_{\text{Ca}}(\gamma_{\text{OH}})^2} = 10^{-5}/(0,9 \cdot 0,98^2) \approx 1,16 \cdot 10^{-5}$ ,  $C_{\text{Cl}}$  – концентрация хлора в растворе ( $2,8 \cdot 10^{-5}$  моль/л),  $z_{\text{Ca}}$ ,  $z_{\text{OH}}$ ,  $z_{\text{Cl}}$  – заряды ионов, равные 2, 1, 1. Таким образом:  $C_{\text{Ca}} \cdot (C_{\text{OH}})^2 = 1,16 \cdot 10^{-5}$  и  $2 \cdot C_{\text{Ca}} - C_{\text{OH}} = 2,8 \cdot 10^{-5}$ ;  $C_{\text{Ca}} \approx 0,014$  моль/л,  $C_{\text{OH}} \approx 0,028$  моль/л.

В случае скачкообразного роста проницаемости образца из-за растворения на 37-е сутки (рисунок 8,9, таблица 1), средняя скорость растворения  $u$  составит  $0,98/53280 \approx 1,84 \cdot 10^{-5}$  см/мин, среднесуточная скорость фильтрации  $v$  в опыте при этом  $5,2 \cdot 10^{-4}$  см/мин. Скорость растворения должна соответствовать действительной скорости перемещения кальция в поровом растворе, тогда согласно уравнению (6) [Шестаков, 2009]:

$$u = \frac{v}{n + \Delta n} \quad (6)$$

где  $n$  – пористость,  $\Delta n$  – аналог коэффициента распределения, с учетом средней пористости образца  $n = 22\%$ ,  $\Delta n = (5,1 \cdot 10^{-4} / 1,84 \cdot 10^{-5}) - 0,22 \approx 27,5$ . Так как  $\Delta n = \Delta N / \Delta C$  изменение содержания кальция в твердом комплексе  $\Delta N_{Ca} = 27,5 \cdot 0,014 \approx 0,385$  моль/л или 15,43 г/л, что с объемом образца  $0,95$  см<sup>3</sup> соответствует изменению массы Са в 0,015 г. Исходя из состава смеси цементного камня и массы образца в 1,54 г, исходное содержание кальция до фильтрации в форме СаО составляет 0,12 г. Общая потеря массы образца составляет 0,19 г. Таким образом, скачкообразный рост  $K_f$  может быть связан с растворением 12 % кальция в составе цемента.

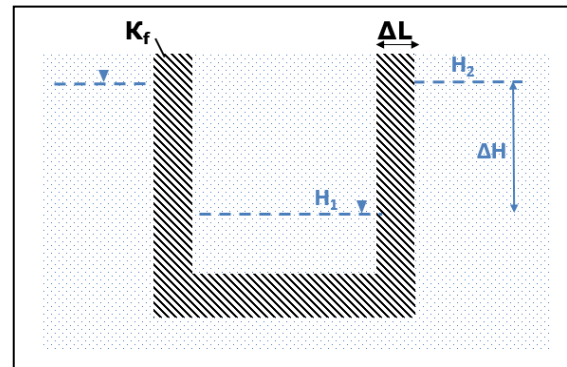
#### Пример расчета растворения в барьере

Предлагается имитационный расчет выноса Са из исследованного материала на основе бетона в качестве консервативного для сравнения устойчивости природных и искусственных слабопроницаемых материалов при скорости фильтрации в условиях инженерно-геологического массива (рисунок 11).

При известном из опыта вкладе растворения в изменение расхода и при изученном в ходе того же опыта коэффициенте фильтрации, при полуметровой толщине барьера и семиметровом перепаде напора на сторонах барьера, рост  $K_f$  из-за растворения возможен через длительное время: при известных из опыта (рисунок 8, таблица 1, формулы 5, 6)  $\Delta n$  и  $K_f$  имитационный расчет динамики выноса Са из

пористого материала, при его толщине  $\Delta l$  и перепаде давления ( $\Delta H$ ) на сторонах:

$$u = K_f \cdot (\Delta H) / \Delta l \cdot (n + \Delta n) = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ [м/сут]} \cdot 7 \text{ [м]} / 0,5 \text{ [м]} \cdot (0,22 + 27,52) = 2,49 \cdot 10^{-6} \text{ [м/сут]}, \text{ или } \approx 540 \text{ лет.}$$



**Рисунок 11.** Фильтрационная схема к имитационному расчету динамики выноса Са из пористого материала при его толщине  $\Delta L$ , перепаде давления  $\Delta H$  и известных из эксперимента  $\Delta n$  и  $K_f$

**Figure 11.** Filtration scheme for simulation calculation of Ca removal dynamics from porous material at its thickness  $\Delta L$ , pressure drop  $\Delta H$  and known from the experiment  $\Delta n$  and  $K_f$

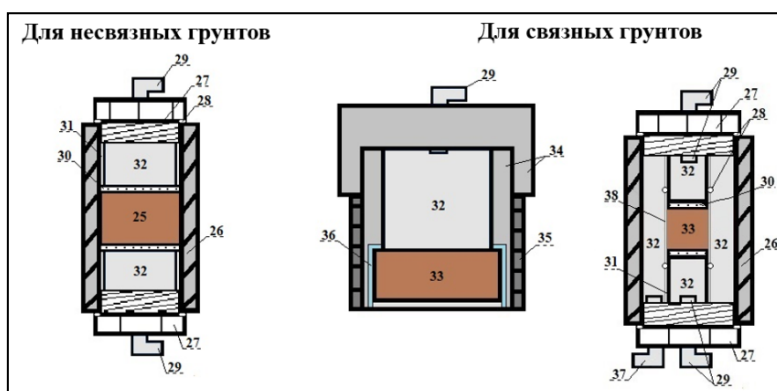
*Пристеночная фильтрация.* Эффект пристеночной фильтрации между стенками образца и ёмкости осложняет ход опыта, в котором весь расход фильтрации должен идти именно через образец. Согласно ГОСТ 12730.5–2018 (Бетоны. Методы определения водонепроницаемости)<sup>18</sup> для ликвидации пристеночной фильтрации используются различные герметизирующие мастики, которые должны полностью исключить фильтрацию между образцом и емкостью, однако зачастую не удается полностью исключить этот эффект, так как герметизирующий состав может иметь плохую адгезию к поверхности конкретного барьерного материала. Фильтрат может быть агрессивен к составу герметика, тем самым способствуя пристеночной фильтрации и осложняя интерпретацию при миграционных исследованиях в образцах. Таким образом, герметизирующий состав должен подбираться строго индивидуально для фильтрационных

<sup>18</sup> ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»

испытаний на конкретном материале с фильтратом определенного состава. Отметим, что основной инструмент контроля отсутствия пристеночной фильтрации – начальная и периодическая визуальная проверка герметичности контрольного образца путем опрессовки воздухом под водой, что достигается конструкцией контрольной емкости с образцом, которая имеет открытый торец (рисунок 12).

Емкости для фильтрационных испытаний созданы самостоятельно и выполнены из полимерных материалов (полипропилен, фторопласт, оргстекло) (рисунок 12) для

исключения коррозии на контакте с образцом и раствором, что имеет место при длительных испытаниях на стандартных фильтрационных приборах и о чем указано в статье [Царев, 2024]. Образец связного грунта может герметизироваться мастикой по стенкам, как указано на средней схеме, или по принципу работы камеры трехосного сжатия (или пермеаметра<sup>19</sup>), герметизируя пристеночное пространство образца давлением воды (рисунок 12), при этом все ёмкости выполняются из инертных материалов.



**Рисунок 12.** Полимерные ёмкости для размещения образцов: 25 – сыпучий материал заданной плотности; 26 – прозрачный корпус емкости для образца; 27 – резьбовая заглушка;

28 – уплотнительное кольцо; 29 – фитинг угловой с резьбой для фильтрационной трубки; 30 – твердый пористый фильтр; 31 – проставки ограничивающие высоту образца; 32 – жидкость; 33 – образец твердого материала; 34 – корпус емкости образца; 35 – стальная гильза; 36 – герметизирующая мастика; 37 – фитинг угловой с резьбой для создания бокового обжатия

**Figure 12.** Polymeric containers for placing samples: 25 – bulk material of specified density; 26 – transparent body of the sample container; 27 – threaded plug; 28 – sealing ring; 29 – corner fitting with thread for filter tube; 30 – solid porous filter; 31 – spacers limiting the height of the sample; 32 – liquid; 33 – sample of solid material; 34 – sample container body; 35 – steel sleeve; 36 – sealing mastic; 37 – angle fitting with thread for creating lateral compression

Эффект пристеночной фильтрации хотя и осложняет выполнение долговременных лабораторных опытов, но и сам по себе может быть использован для оценки качества применяемой гидроизоляции горных выработок с учетом состава барьерного материала, раствора, температуры, напора фильтрации.

*Начальный градиент фильтрации ( $I_0$ ).* Для возникновения фильтрации через слабопроницаемый материал необходимо наличие гидрогеологических и гидрологических

условий, при которых возможно превышение величины начального градиента напора  $I_0$ . Градиент напора в реальных гидрогеологических условиях редко превышает 60 и зависит от материала (грунта). По различным данным, значения  $I_0$  изменяются для бетонов от 7 до 55 [Элбакидзе, 1988], и от 0 до 100 в опытах с глинами [Гольдберг, 1986], таким образом фильтрация в инженерно-геологическом массиве может возникнуть при градиентах порядка 5–10 и

<sup>19</sup> Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

в этом случае значение  $I_0$  может быть учтено для барьерного материала.

Описание и изучение фильтрации при низких градиентах выполнялось различными авторами [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988; Шестаков, 2008; Павилонский, 1968; Dixon, 1999]. Существование  $I_0$  объясняется в литературе [Шестаков, 2008] молекулярным взаимодействием воды и породы с основным законом фильтрации в виде (7).

$$V = K\phi \cdot \left[ I - \frac{4}{3} \cdot I_0 - \frac{I_0}{3} \left( \frac{I_0}{I} \right)^3 \right] \quad (7)$$

$K\phi$  – коэффициент фильтрации [м/сут];  $V$  – скорость фильтрации [м/сут];  $I$  – градиент фильтрации [М<sub>вод.ст.</sub>/М];  $I_0$  – начальный градиент фильтрации [М<sub>вод.ст.</sub>/М].

Скорость фильтрации через образец глиноземистого цементного камня (рисунок 7) исследовалась при снижении градиента фильтрации [Царев, 2023а] до полной остановки фильтрации, зафиксировано значение  $I_0 = 108$ . Тем же способом исследовался и неуплотненный бентонитовый порошок [Царев, 2023а], с той разницей что значение  $I_0 = 38$  бентонитового порошка оценено только по теоретической формуле 7 и не подтверждено экспериментально остановкой фильтрации, так как бентонитовая глина имела  $K\phi$  порядка  $10^{-7}$  м/сут, что на три порядка меньше, чем для образца глиноземистого цементного камня (таблица 1). Таким образом, экспериментально подтвержденная остановка фильтрации с высоким значением  $I_0$  для образца цементного камня говорит о вероятном протекании в образце процессов отличных от физического процесса сдерживания воды межмолекулярными силами взаимодействия воды и породы, предположительно коагуляции порового пространства твердыми частицами слаборастворимых минералов в процессе фильтрационного опыта.

Рассчитанное по экспериментальным данным значение  $I_0 = 38$  для бентонитовой глины превышает теоретические, подсчитанные в [Шестаков, 2008] значения  $I_0$  для глинистых грунтов (составляющие около единицы), при этом в [Шестаков, 2008] в качестве параметров от которых зависит величина  $I_0$  рассматриваются:

плотность и вязкость жидкости, начальное напряжение сдвига, пористость и коэффициент фильтрации. В работе [Павилонский, 1968] произведена сравнительная оценка величин  $I_0$  полученных расчетным и экспериментальным способом, в качестве параметров от которых зависит  $I_0$  дополнительно рассматриваются количество связанной воды и удельная поверхность грунта. Таким образом, значения  $I_0$  для глинистых грунтов с большим содержанием набухающих минералов (такие как бентонитовая глина) могут превышать указанные в [Шестаков, 2008], однако без экспериментального подтверждения с полной остановкой фильтрации эти значения не следует принимать за действительные, к тому же как отмечалось в работе [Павилонский, 1968] экстраполяция по графику  $V(I)$  может дать ошибочный результат. По мнению авторов работы [Павилонский, 1968], экспериментальные величины  $I_0$  незначительны (не превышают единицы), поэтому при сооружении барьеров предлагается не принимать их в расчет; при этом отмечена сложность фильтрации в глинистых грунтах, которую не учитывают теоретические формулы для определения значения  $I_0$  основанные на замене реального грунта фиктивным (системе капиллярных трубок одинакового диаметра).

Вероятной причиной регистрации значений  $I_0$  разными исследователями [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988] могла стать и низкая точность регистрации расхода фильтрации. В дальнейшем нами запланированы эксперименты с изучением скорости перераспределения порового давления в образцах слабопроницаемых материалов, что может дать возможность оценить влияние водоотдачи в нестационарный период и характер нелинейности  $V(I)$ . Учитывая неоднозначность выводов разных исследователей о проявлении начального градиента фильтрации и сложность фильтрационных процессов при этом, с нашей точки зрения, практический вопрос полезно ограничить оценкой значения расхода фильтрации через образцы барьерных материалов именно для гидрогеологических условий объекта.

## Выводы

Физико-химические изменения, влияющие на структуру и свойства слабопроницаемых

барьерных материалов, являются сложными; влияние условий и воздействий на проницаемость и миграционные свойства барьеров на период долгосрочного применения ИИБ при различных инженерно-геологических условиях требуют учета. Степень химической деградации может изучаться с точки зрения изменения водопроницаемости, которая рассматривается авторами как один из важнейших показателей общей деградации материала в ходе эволюции системы захоронения РАО.

Предлагаемый в настоящей работе подход применим для консервативной оценки фильтрационной устойчивости барьерных материалов и включает в себя: длительный фильтрационный опыт через образцы при постоянном давлении воды; оценку  $K_f$  и  $I_o$  образца материала, исследование химического состава вытяжки раствора в исходном образце и после выщелачивания фильтратом порового пространства образца в ходе фильтрации; экспериментальную оценку времени до изменения фильтрационных свойств образца в результате растворения; изучение изменения в структуре образцов методами КТ и СЭМ; имитационную расчетную оценку изменения массы вещества влияющего на пористость и фильтрационной устойчивости материала при заданной его толщине от растворения при реальной скорости фильтрации. Результаты работ предшественников [Jacques, 2013] на наш взгляд продемонстрировали, что решение уравнений в универсальных симуляторах (таких как COMSOL Multiphysics и др.) позволяет в значительной степени упростить реализацию расчетов. Методы КТ и СЭМ позволяют выполнить оценку изменения структуры порового пространства, морфологии пор барьерных материалов для контроля результатов испытаний, моделирующих сценарии эволюции системы захоронения РАО.

Деградация противифльтрационных свойств испытанного образца бетона проявляется скачкообразно (из-за выноса Са). Для различных материалов необходимо индивидуальное изучение кинетики деградации

противофильтрационных свойств. В большинстве природных условий приповерхностного захоронения на начальных этапах фильтрация через поровое пространство исследованного материала будет минимальной. Вследствие низкой проницаемости или отсутствовать при кольматации пор. Таким образом, при создании барьера из исследованного цементного камня необходим учет времени водонасыщения за счет капиллярного увлажнения и учет малых скоростей выноса.

Для материалов инженерных барьеров безопасности, состав которых подбирается экспериментально с использованием различных минералов и добавок [Лотов, 2015; Райтбурд, 1968; Семенов, 2009; Тольпина, 2016], должны учитываться процессы изменения минеральных веществ (растворение и замещение и др.), ведущие к изменению плотности, пористости и проницаемости [Гольдберг, 1986; Элбакидзе, 1988], что дополняет существующие подходы<sup>20,21,22</sup>. На наш взгляд, проведение длительных фильтрационных испытаний целесообразно, так как изолирующие свойства применяемых барьеров должны сохраняться в течении всего срока службы барьера, для исключения утечек из сооружения и снижения несущей способности при хранении и захоронении РАО, а также для обоснования долгосрочных гидрогеологических прогнозов в части эволюции фильтрационных и миграционных свойств барьерных материалов. Предлагаемый подход и оборудование могут быть применены при изучении эволюции барьерных материалов, подтверждения срока их службы и обоснования интенсивности выхода токсичных веществ и радионуклидов за пределы барьеров. Помимо ППЗРО, объекты, на которых ведется проектирование и сооружение барьеров для защиты от загрязнения, представлены на территории России и других стран полигонами бытовых отходов, а также отходов горнорудного и химического производства.

Для исследования зависимости  $V(I)$  в слабопроницаемых грунтах и барьерных

<sup>20</sup> ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности».

<sup>21</sup> ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

<sup>22</sup> ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».

материалах, необходима высокая точность измерения расхода фильтрации, достижение стабилизации скорости фильтрации на каждой ступени градиента. Отметим, что нелинейность  $V(I)$  может быть обусловлена деформацией порового пространства или его кольматацией. Получение таких данных связано с временными ограничениями и возможно только с помощью высокоточных лабораторных весов и расходомеров, что существенно облегчается автоматической записью расхода и параллельным испытанием большого количества образцов для разных условий.

1. Рекомендуются дополнить действующие федеральные нормы и правила, регламентирующие учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии<sup>23</sup>, определением «внешнее воздействие» – воздействием, которое вызвано внешними по отношению к ОИАЭ процессами, явлениями и факторами техногенного или природного происхождения. Таким образом, долговременное изменение свойств барьеров безопасности должно рассматриваться в зависимости от гидрогеологических и инженерно-геологических условий ППЗРО, входящих в определение «внешние воздействия».

2. В выполненной работе продемонстрировано, что изменение фильтрационных свойств может служить показателем деградации материала, что указывает на необходимость оценки изменения фильтрационных свойств барьерных материалов с учетом прогнозируемых внутренних и внешних воздействий на долгосрочный период эксплуатации ИББ.

3. Методический подход, приведенный в работе, может позволить развить и

детализировать требования нормативной документации различного уровня<sup>23,24,25,26</sup> в части:

- необходимости оценки гидравлической проницаемости  $K_f$  и сорбционной способности по отношению к радионуклидам  $K_d$  не только для буферных материалов, но и для всех барьеров безопасности, включая бетон строительных конструкций, подстилающий и покрывающий экраны;
- необходимости учета времени изменения этих характеристик в период потенциальной опасности захороненных РАО с учетом опытных данных (гидрогеологический и геотехнический мониторинг ближней зоны или лабораторные оценки изменения сорбционных и фильтрационных свойств);
- установления (определения) для каждого из ИББ параметров и характеристик, с учетом их изменения во времени;
- формирования сводной таблицы, содержащей учитываемые внешние процессы и их параметры для каждого из ИББ;
- учета в перечне внешних воздействий гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических условий, влияющих на изменение свойств ИББ.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность Алексею Владимировичу Родину за выполнение исследований с применением масс-спектрометра ICP-MS (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), старшему научному сотруднику НИИ строительных материалов и технологий Медведеву Вячеславу Викторовичу за выполнение исследований с применением термогравиметрического анализа и анализа ДТА и специалистам: Расторгуеву Александру Владиленовичу, Куваеву Андрею Алексеевичу, Анисимову Николаю Александровичу и Сорокину Валерию Трофимовичу за отдельные

<sup>23</sup> НП-064-17 (Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии) не содержат определения «внешних воздействий»

<sup>24</sup> НП-069-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности».

<sup>25</sup> НП-055-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»

<sup>26</sup> РБ-117-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов»

ценные замечания, оказавшие значительную роль при подготовке статьи.

### Acknowledgments

The authors would like to thank Alexey Vladimirovich Rodin for performing the studies using ICP-MS mass spectrometer (Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety), Medvedev Vyacheslav Viktorovich, senior researcher at the

### Литература

Анисимов Н. А., Куваев А. А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.

Воронков М.Е. Взаимодействия кремнеземсодержащих добавок в цементных композициях в условиях щелочного расширения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Санкт-Петербург, 2013, 117 с.

Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М.: Изд-во Недр, 1986. 160 с.

Иванов И.А., Шатков Е.М., Сорокин В.Т., Гулин А.Н. Диффузия радионуклидов в цементосодержащих материалах // Радиохимия. 1994. Т. 36, вып. 2.

Игин И. М., Минин А. В., Бамборин М. Ю., Кузьмин Е. В., Трофимова Ю. В. Определение прогнозных сроков долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов при различных сценариях их эксплуатации // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.

Лавров Н.П., Величкин В.И., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В. Т. 5: Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. — М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. 280 с.

Лотов В. А. Применение модифицированного жидкостекольного вяжущего в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2015. №1. С. 72–75.

Research Institute of Construction Materials and Technologies, for performing the studies using thermogravimetric analysis and DTA analysis, and specialists: Rastorguev Alexander Vladilenovich, Kuvaev Andrey Alekseevich, Anisimov Nikolay Aleksandrovich and Sorokin Valeriy Trofimovich for some valuable comments that played a significant role in the preparation of the article.

### References

*Ageing management of concrete structures in nuclear power plants*. International Atomic Energy Agency. Series: IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807. 2016, no. NP-T-3.5.

Anisimov N. A., Kuvaev A. A. Chislennoe modelirovanie vlagoperenosa v konstrukciyah pripoverhnostnogo punkta zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Numerical modeling of moisture transfer in structures of a near-surface radioactive waste disposal facility]. *Radioaktivnye othody [Radioactive Waste]*, 2022, no. 3 (20), pp. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.

Dixon D.A., Graham J., Gray M.N. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36 (5), pp 815–825. DOI:10.1139/t99-057.

Dron R., Privot F. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction: Part I. Concepts. *Cement Concrete Re*, 1992, vol. 22, pp. 941–948.

Elbakidze M. G. Fil'traciya vody cherez beton i betonnye gidrotekhnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie. Biblioteka gidrotekhnika i gidroenergetika. [Water filtration through concrete and concrete hydraulic structures: a tutorial. Library of hydraulic engineering and hydropower.]. M, Energoatomizdat Publ., 1988, 104 p.

Goldberg V. M., Skvortsov N. P. Pronicaemost' i fil'traciya v glinah [Permeability and filtration in clays]. M: Nedra Publ., 1986, 160 p.

Igin I. M., Minin A. V., Bamborin M. Yu., Kuz'min E. V., Trofimova Yu. V. Opredelenie prognoznyh srokov dolgovremennoj bezopasnosti punktov pripoverhnostnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov pri razlichnyh scenariyah ih ekspluatcii. *Radioaktivnye othody [Determination of the predicted long-term safety periods of a near-surface disposal site for radioactive waste under various operating conditions]*. *Radioactive Waste*, 2022, № 3

- Павилонский В.М. К вопросу о начальном градиенте напора в глинистых грунтах // Труды института ВОДГЕО, выпуск 19. 1968. с. 78–85.
- Райтбурд Ц. М., Слонимская М. В. Кристаллохимия поверхности глинистых минералов и микроструктура глин. Физические и химические процессы и фракции. М.: Наука, 1968. 41 с.
- Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. Санкт-Петербург: Наука, 2020. 144 с.
- Семенов В. Б., Ключев А. Н. Щелочно-силикатный бетон с добавкой целлюлозы // Гидротехническое строительство. 2009. № 4. С. 59–61.
- Сорокин В. Т., Гатауллин Р. М., Свиридов Н. В., Павлов Д. И. Долговечность железобетонных контейнеров типа НЗК-150-1,5П при захоронении радиоактивных отходов 2 класса // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 37–49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.
- Толытина Н. М. Физико-химические основы повышения коррозионной стойкости цементных систем путем оптимизации вещественного состава. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Белгород, 2016. 393 с.
- Царев М. А., Лободенко И. Ю. Методы оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов, учет воздействий на проницаемость. Фундаменты. — М.: Изд-во «Международная ассоциация фундаментостроителей IAFС». ISSN: 2713-3354. 2024. №1. С. 44–48.
- Царев М. А. Экспериментальная оценка устойчивости фильтрационных параметров искусственных грунтов. — М.: Материалы XVIII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». 2023а. 269 с.
- Царев М. А., Лободенко И. Ю. Экспериментальная оценка противотрационных свойств пористых материалов для долговременной защиты зданий и сооружений. — Сочи, 9–13 октября. Сборник тезисов докладов XV Российской Национальной Конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием). 2023б. С. 172–178.
- (20), pp. 50–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-50-60.
- Ivanov I.A., E.M. Shatkov, Sorokin V.T., Gulin A.N. Diffuziya radionuklidov v cementosoderzhashchih materialah [Diffusion of radionuclides in cement-containing materials]. *Radiohimiya [Radiochemistry]*, 1994, vol. 36, iss. 2.
- Jacques D., Perko J., Seetharam S., Mallants D., Govaerts J.. IAEA, 2013, pp.26. DOI:10.13140/RG.2.2.15374.77129.
- Laverov N.P., Velichkin V.I., Omel'yanenko B.I., YUdincev S.V., Petrov V.A., Bychkov A.V. T. 5: *Izolyaciya otrabotavshih yadernyh materialov: geologo-geohimicheskie osnovy [Isolation of spent nuclear materials: geological and geochemical principles]*. M: IGEM RAN; IFZ RAN Publishing House, 2008, 280 p.
- Lotov V. A. Primenenie modifitsirovannogo zhidkostekol'nogo vyazhushchego v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Application of modified liquid glass binder in the production of building materials]. *Stroitel'nye materialy [Building materials]*, 2015, no.1, pp. 72–75.
- Medvedev V., Pustovgar A., Adamtsevich A., Adamtsevich L. Concrete Carbonation of Deep Burial Storage Constructions under Model Aging Conditions. *Buildings*, 2024, 14, 8.
- Pavilonskij V.M. K voprosu o nachal'nom gradiente napora v glinistyh gruntah [On the issue of the initial pressure gradient in clay soils]. *Trudy instituta VODGEO [Proceedings of the VODGEO Institute]*, 1968, no. 19, pp. 78–85.
- Rajtburd C. M., Slonimskaya M. V. *Kristallohimiya poverhnosti glinistyh mineralov i mikrostruktura glin. Fizicheskie i himicheskie processy i frakcii. [Crystal chemistry of clay mineral surfaces and microstructure of clays. Physical and chemical processes and fractions]*. M: Nauka Publ., 1968, 41 p.
- Rumynin V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnyh vod [Theory and methods of studying groundwater pollution]*. Saint-Petersburg. Nauka Publ., 2020, 144 p.
- Semenov V. B., Klyuev A. N. SHChelochno-silikatnyj beton s dobavkoj cellyulozy [Alkali-silicate concrete with cellulose additive]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 2009, vol. 4, pp. 59–61.

- Царев М. А., Лободенко И. Ю., Понизов А. В., Родин А. В. Экспериментальная оценка изменения фильтрационных свойств геохимического барьерного материала на основе бетона при растворении. — Томск. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V всероссийской научной конференции с международным участием им. проф. С. Л. Шварцева. 2023с. С. 95–100.
- Царев М. А. Результаты использования экспериментального фильтрационного комплекса с автоматизированной системой сбора информации для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых материалов. — М.: Материалы XVII общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». 2022. 442 с.
- Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во «КДУ», 2009. С. 37–41.
- Элбакидзе М. Г. Фильтрация воды через бетон и бетонные гидротехнические сооружения: учебное пособие. Библиотека гидротехника и гидроэнергетика. М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1988. 104 с.
- Ageing management of concrete structures in nuclear power plants // International Atomic Energy Agency. Series: IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807. 2016. no. NP-T-3.5
- Dixon D.A., Graham J., Gray M.N. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients // Canadian Geotechnical Journal. 1999. 36 (5). P 815–825. DOI:10.1139/t99-057.
- Dron R., Privot F. Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction: Part I. Concepts // Cement Concrete Res. 1992. Vol. 22. P. 941–948.
- Jacques D., Perko J., Seetharam S., Mallants D., Govaerts J. Modelling long-term evolution of cementitious materials used in waste disposal // Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal. Publisher: IAEA. 2013. P.26. DOI:10.13140/RG.2.2.15374.77129.
- Medvedev V., Pustovgar A., Adamtsevich A., Adamtsevich L. Concrete Carbonation of Deep Burial Storage Constructions under Model Aging Conditions // Buildings. 2024. Vol. 14. 8. DOI:10.3390/buildings14010008.
- Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika [Hydrogeodynamics]*. М., KDU Publ., 2009, pp. 37–41.
- Sorokin V. T., Gataullin R. M., Sviridov N. V., Pavlov D. I. Dolgovechnost' zhelezobetonnyh kontejnerov tipa NZK-150-1,5P pri zahoroneni radioaktivnyh othodov 2 klassa [Durability of reinforced concrete containers of the NZK-150-1.5P type for the disposal of class 2 radioactive waste]. *Radioaktivnye othody [Radioactive Waste]*, 2022, № 3 (20), pp. 37–49. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-37-49.
- Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu. Metody ocenki koefitsienta fil'tracii slabopronicaemykh materialov, uchet vozdeystvij na pronicaemost' [Methods for assessing the filtration coefficient of low-permeability materials, taking into account the impact on permeability]. *Fundamenty [Foundations]*. Moscow, Publ. International Association of Foundation Builders IAFC, 2024, №1, pp. 44–48.
- Tsarev M. A. Eksperimental'naya ocenka ustojchivosti fil'tracionnykh parametrov iskusstvennykh gruntov [Experimental assessment of the stability of filtration parameters of artificial soils]. *Materialy XVIII obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» [Proceedings of the XVIII All-Russian scientific and practical conf. "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation"]*, Moscow, 2023a, 269 p. (in Russian)
- Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu. Eksperimental'naya ocenka protivofil'tracionnykh svoystv poristykh materialov dlya dolgovremennoj zashchity zdaniy i sooruzhenij [Experimental assessment of anti-filtration properties of porous materials for long-term protection of buildings and structures]. *Sbornik tezisov dokladov XV Rossijskoj Nacional'noj Konf. po sejsmostojkomu stroitel'stvu i sejsmicheskomu rajonirovaniyu (s mezhdunarodnym uchastiem) [Collection of abstracts of reports of the XV Russian National Conf. on Earthquake-resistant construction and seismic zoning]*. Sochi, October 9–13, 2023b, pp. 172–178. (in Russian)
- Tsarev M. A., Lobodenko I. Yu., Ponizov A. V., Rodin A. V. Eksperimental'naya ocenka izmeneniya fil'tracionnykh svoystv geohimicheskogo bar'ernogo materiala na osnove betona pri rastvorenii [Experimental assessment of changes in the filtration properties of a geochemical barrier material based on concrete during dissolution]. *Geologicheskaya evolyuciya vzaimodejstviya vody s gornymi porodami: trudy V vsersossijskoj nauchnoj konf. im.*

*prof. S. L. Shvarceva [Geological evolution of the interaction of water with rocks: Proceedings of the V All-Russian scientific conf. named after prof. S. L. Shvartsev], Tomsk, 2023c, pp. 95–100. (in Russian)*

Tsarev M. A. Rezul'taty ispol'zovaniya eksperimental'nogo fil'tracionnogo kompleksa s avtomatizirovannoj sistemoj sbora informacii dlya ocenki koeficienta fil'tracii slabopronicaemyh materialov [Results of using an experimental filtration complex with an automated data collection system to assess the filtration coefficient of low-permeability materials]. *Materialy XVII obshcherossijskoj nauchno-prakticheskoj konf. i vyst. «Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossijskoj Federacii» [Proceedings of the XVII All-Russian scientific and practical conf. and exh. "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation]*, M., 2022, 442 p. (in Russian)

Tolypina N. M. *Fiziko-himicheskie osnovy povysheniya korrozionnoj stojkosti cementnyh sistem putem optimizacii veshchestvennogo sostava. Diss. soisk. uch. st. dokt. tekhn. n. [Physicochemical bases for increasing corrosion resistance of cement systems by optimizing the material composition. D. (Technical sciences) Thesis]*, Belgorod, 2016, 393 p.

Voronkov M.E. *Vzaimodejstviya kremnezemsoderzhashchih dobavok v cementnyh kompozitsiyah v usloviyah shchelochnogo rasshireniya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata nauk [Interactions of silica-containing additives in cement compositions under alkaline expansion conditions. Ph. D. Thesis]*, Saint-Petersburg, 2013, 117 p.