

*Бессонов И.А., Чалтанов С.В., Лезов А.Д., Таишыков О.Л., Климова В.А.,
Морданов С.В., Хомяков А.П., Ремез В.П.*

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЕНТОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ

Аннотация. Проведен эксперимент с измерением гидравлического сопротивления слоя сорбента, а затем в пакете вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation (SW FS) проведено компьютерное моделирование течения среды через сорбенты с теми же свойствами, что и в эксперименте. Представлено сравнение результатов эксперимента и моделирования, сделан вывод о возможности использования SW FS для дальнейшей оптимизации фильтр-контейнеров.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, сорбент, SolidWorks Flow Simulation, фильтр-контейнер.

Abstract. An experiment was carried out with the measurement of the sorbent layer hydraulic resistance, and then a computer simulation of the water flow through sorbents with the same properties as in the experiment was carried out with the computational hydrodynamics package SolidWorks Flow Simulation (SW FS). Comparison of the results of experiment and simulation is presented, it is concluded that it is possible to use SW FS for further optimization of filter containers.

Keywords: hydraulic resistance, sorbent, SolidWorks Flow Simulation, filter container.

Введение

Образование радиоактивных отходов (РАО) является специфической особенностью функционирования АЭС. Поэтому решение проблемы экологически безопасного обращения с РАО, наряду с обеспечением безопасной эксплуатации АЭС, является основным условием приемлемости атомной энергетики как надежного источника, обеспечивающего устойчивое развитие человечества [1].

С 2013 г на АЭС России реализуется стратегия, предусматривающая уменьшение образования, переработку и приведение всех РАО в соответствие с критериями приемлемости, которые установлены НП-093-14 [2].

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при работе реакторных установок, дезактивации оборудования, помещений и спецодежды [3]. ЖРО представляют собой гомогенные или гетерогенные смеси (пульпы, эмульсии, суспензии) в кислом или щелочном состоянии. Эксплуатационные ЖРО загрязнены продуктами деления (цезий, стронций, йод), радионуклидами коррозионного происхождения (кобальт, никель, марганец), веществами,

используемыми для поддержания водно-химического режима и дезактивации оборудования [4-6].

Радиоактивные вещества в растворах кубовых остатков находятся в виде ионов, нейтральных молекул и коллоидных частиц. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются $^{134}, ^{137}\text{Cs}$, ^{60}Co , ^{54}Mn . Для изотопов цезия характерна ионная форма. Радионуклиды кобальта и марганца в кубовых остатках находятся в форме комплексов с соединениями, которые используются для дезактивации оборудования (щавелевая, муравьиная, лимонная и этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА) кислоты).

Кобальт является наиболее радиационно-опасным элементом в составе конструкционных материалов АЭС [7]. Из ^{59}Co образуется ^{60}Co с высокой энергией гамма-квантов (~1,2 МэВ), и большим периодом полураспада (5,272 года). Кобальт-60 и цезий-137 определяют радиационный фон при демонтаже выводимых из эксплуатации блоков АЭС после останова и длительной выдержки [8, 9].

Основной задачей при обращении с ЖРО является окончательная изоляция кондиционированных РАО. Среди методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции (табл. 1). Это определяет её преимущества и позволяет сконцентрировать радионуклиды в небольшом объеме сорбента [10].

Таблица 1 – Коэффициенты сокращения объемов ЖРО при переработке различными методами

Цементирование	Битумирование	Глубокое упаривание	Остекловывание	Селективная сорбция
0,9-1,3	1,5-2,5	2-3	3-4	70-90

Процесс очистки ЖРО на установке ионоселективной очистки (ИСО) включает в себя: предварительную фильтрацию и подготовку исходного раствора, озонирование, фильтрацию и селективную сорбцию на ферроцианидных сорбентах в фильтрах-контейнерах (ФК). Конечными продуктами переработки являются очищенный от радионуклидов солевой раствор, отработавший сорбент в ФК, шлам с фильтров, образующийся в результате озонирования (объемная активность находится на уровне исходных ЖРО) [11].

Для эффективной работы сорбционных фильтров необходимо предварительно разрушить органические комплексоны, в первую очередь кобальта-60, с помощью озонирования.

Разработанная специалистами НПП «ЭКСОРБ» технология COREBRICK™ позволяет последовательно проводить кондиционирование ЖРО и хранить отвержденные отходы с соблюдением требований безопасности для окружающей среды. В основе технологии лежит двухстадийная сорбция с применением уникальных сорбентов, разработанных в НПП «ЭКСОРБ» [11].

Высокая вариативность сорбционных свойств и селективности к различным радионуклидам, а также возможность менять физико-химические параметры сорбентов в зависимости от требований конкретного технологического процесса, позволяют эффективно решать вопросы очистки ЖРО практически любого состава.

Процесс ИСО с использованием сорбентов НПП «ЭКСОРБ» включает следующие этапы: раскочку ЖРО; добавление мелкодисперсного сорбента; перемешивание в течение 1-2 часов (сорбция в статическом режиме); отделение шлама с отработанным сорбентом; сорбцию в динамическом режиме с использованием фильтр-контейнера COREBRICK™ с гранулированным сорбентом. При этом исключается стадия озонирования, не требуется нагревание ЖРО.

На стадии статической сорбции из ЖРО удаляется до 95% активности, оставшиеся 5% извлекаются в динамическом режиме либо на второй стадии статической сорбции. Распределением активности между шламом и фильтр-контейнерами можно управлять для минимизации количества образующихся отходов соответствующего класса.

Очищенный раствор направляется на упаривание для получения нерадиоактивного солевого плава. Шлам, содержащий сорбент, отделяется на штатном оборудовании установки ионоселективной очистки, хорошо цементируется со степенью включения до 40%. Получающийся цементный компаунд соответствует требованиям нормативных документов [2].

Важным условием реализации данной технологии является обеспечение радиационной безопасности. Более 20 лет специалисты кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ ведут работы по различным направлениям практической реализации принципа оптимизации в радиационной защите персонала [12]. Проведен ряд расчетно-экспериментальных исследований [13], [14] различных материалов с целью оптимизация радиационной защиты фильтр-контейнеров, содержащих сорбент, насыщенный радионуклидами.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели пористого слоя сорбентов, которые используются при кондиционировании ЖРО как фильтрующий материал. Модель пористого слоя войдет в состав расширенной модели, предназначенной для исследования гидродинамики течения в установке ионоселективной очистки.

Для решения поставленных задач мы воспользуемся методами экспериментального определения гидродинамического сопротивления пористого слоя и методами моделирования в пакете вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation.

Теоретическое обоснование

Текущая среда (жидкость или газ) движется через неподвижный слой зернистого материала, проходя в свободном объеме по каналам между твердыми частицами. Движение характеризуется периодическими сужениями и расширениями отдельных струй, на которые разделяется поток среды при входе в пористый слой, и извилистостью пути струй по поровым каналам.

Характер движения потока в слое, частота сужений и расширений отдельных струй, а также их извилистость определяются размером и шероховатостью частиц слоя зернистого материала, их фракционным составом, формой и упорядоченностью укладки, величиной объема пустот между частицами, влиянием стенок аппарата, физическими параметрами потока (плотность, вязкость).

Важнейшей характеристикой слоя является его порозность или доля свободного объема ε :

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{п}}}{V} = 1 - \frac{V_{\text{ч}}}{V}, \quad (1)$$

где V – объем слоя; $V_{\text{п}}$ – суммарный объем поровых каналов в слое; $V_{\text{ч}}$ – суммарный объем твердых частиц в слое.

Сорбенты, рассматриваемые в данной работе, состоят из частиц неодинакового размера и формы. При проведении гидродинамических расчетов для таких слоев обычно используют зависимости для моодисперсного слоя шаровых частиц. При этом вычисляют средний диаметр частиц, который определяется как средневзвешенная величина по весовому содержанию x_i частиц диаметром d_i :

$$d = \frac{1}{\sum(x_i/d_i)}. \quad (2)$$

Частицы не шарообразной формы характеризуются эквивалентным диаметром:

$$d_{\text{ч}} = d_{\text{рш}} \cdot \varphi. \quad (3)$$

где: $d_{\text{рш}}$ – диаметр равновеликого по объему (весу) шара, м; φ – коэффициент формы, равный отношению поверхности равновеликого по объему шара к поверхности частицы [15].

Скоростью фильтрации, или фиктивной скоростью, называют среднюю скорость потока, отнесенную к поперечному сечению аппарата.

Гидравлическое сопротивление слоя зернистого материала (потеря напора в слое) может быть определено по уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d_k} \frac{w_k^2}{2} \rho, \quad (4)$$

где w_k – скорость потока в сечении поровых каналов; H – высота слоя; d_k – эквивалентный диаметр поровых каналов; ρ – плотность жидкости, кг/м³; λ – коэффициент гидравлического сопротивления [16].

Скорость потока среды в поровых каналах w_k можно определить через скорость потока среды, рассчитанную на полное сечение слоя w (скорость фильтрации):

$$w_k = \frac{w}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Для монодисперсного слоя, состоящего из шаровых элементов диаметром d , эквивалентный диаметр порового канала равен:

$$d_k = \frac{2 \cdot d \cdot \varepsilon}{3 \cdot (1 - \varepsilon)}. \quad (6)$$

С учетом этой зависимости уравнение (4) для расчета гидравлического сопротивления при движении потока в слое зернистого материала можно представить следующим образом

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d} \frac{w^2}{2} \rho \frac{3(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}. \quad (7)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления λ может быть определен по уравнению:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (8)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от условий взаимодействия потока и слоя твердых частиц; Re – число Рейнольдса, которое определяется уравнением:

$$Re = \frac{w_k \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}, \quad (9)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Подставив в уравнение (9) выражения для скорости потока в каналах (5) и размера сечения канала (6), получим

$$Re = \frac{2}{3} \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{2}{3 \cdot (1 - \varepsilon)} Re_q, \quad (10)$$

где Re_q – число Рейнольдса, вычисленное по среднему диаметру частиц:

$$Re_q = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}. \quad (11)$$

Подставляя в (7) выражение для коэффициента гидравлического сопротивления (8) с коэффициентами $A = 134$ и $B = 2,34$, получаем расчетное уравнение, предложенное Эргуном, которое хорошо аппроксимирует экспериментальные данные различных авторов по гидравлическому сопротивлению слоя зернистого материала и рекомендуется для технических расчетов:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \omega \cdot \mu}{\varepsilon^3 d^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon \rho \cdot \omega^2}{\varepsilon^3 d}. \quad (12)$$

Для слоя зернистого материала при свободной укладке расчетные значения, полученные по уравнению (12), совпадают с экспериментальными данными с точностью $\pm 25\%$. Это уравнение не рекомендуется применять для плотных слоев с упорядоченной укладкой или засыпок с повышенной порозностью ($\varepsilon = 0,6 \div 0,98$), так как при этом уравнение Эргуна занижает значения перепада давления.

Согласно уравнению (12), падение давления при течении через пористый слой, представляет собой сумму потерь на трение за счет сил вязкости (вязкостные потери) и потерь кинетической энергии потока при его движении по каналам между частицами слоя. При малых значениях критерия Рейнольдса потери кинетической энергии потока относительно малы, ими можно пренебречь. Исходя из этого, уравнение (12) примет вид:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \omega \cdot \mu}{\varepsilon^3 d^2}. \quad (13)$$

При больших значениях критерия Рейнольдса, наоборот, из-за относительно малой величины потерь на трение можно учитывать только потери кинетической энергии потока. Тогда уравнение (12) примет вид:




$$\frac{\Delta P}{H} = 1,75 \frac{1 - \varepsilon \rho \cdot \omega^2}{\varepsilon^3 d}. \quad (14)$$

Материалы

Для исследования были выбраны три сорбента Научно-производственного предприятия «Эксорб», занимающего ведущее место в производстве сорбентов для ионоселективной очистки в России и мире. Свойства исследуемых сорбентов представлены в табл. 2. Все сорбенты имеют разную форму частиц и значения порозности.

Слой сорбента состоит из множества элементов неправильной формы, имеет сложную и носящую статистический характер геометрическую структуру. Если масштабы течения велики по сравнению с размерами частиц слоя, то его моделируют как квазиоднородную среду с одной обобщенной характеристикой – проницаемостью.

Таблица 2 – Свойства исследуемых сорбентов

Параметр	Образец		
	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС
Марка сорбента	СМЕТ	РАЦИР	МОДИКС
Насыпная плотность, кг/м ³	1320	1092	959
Порозность	0,214	0,187	0,234
Истинная плотность, кг/м ³	1681	1343	1252
Средний размер частиц, мм	0,9	0,8	1,4
Микрофотография частиц сорбентов, размер масштабной сетки – 0,1 мм			

Сорбент СМЕТ является неорганическим сорбентом на основе сульфидов меди. Представляет собой микрочастицы сульфидов меди, химически закреплённые на гранулах природного алюмосиликата (опала). Пористый носитель в составе сорбента обеспечивает большую доступность сорбционных центров, что повышает ёмкость сорбента на единицу массы сорбирующего вещества и улучшает кинетику сорбции. Сульфид меди извлекает из водных растворов ионы сурьмы, ртути, мышьяка, кадмия, кобальта и серебра. Может работать в растворах с солесодержанием до 500 г/дм³.

Сорбент МОДИКС является неорганическим сорбентом на основе диоксида марганца. Носителем для сорбирующего вещества в композиционном сорбенте служит природный алюмосиликат (опал). Диоксид марганца извлекает из водных растворов ионы стронция, плутония, урана, дочерние продукты распада радона.

Сорбент РАЦИР является неорганическим сорбентом на основе гидроксида циркония. Представляет собой микрочастицы гидроксида циркония, химически закреплённые на гранулах природного алюмосиликата (опала). Пористый носитель в составе сорбента обеспечивает большую доступность сорбционных центров, что повышает ёмкость сорбента на единицу массы сорбирующего вещества и улучшает кинетику сорбции. Химическая формула сорбирующего

вещества $ZrO_x(OH)_y$, где $x = 0 \dots 1$, $y = 2 \dots 4$. Гидроксид-оксид циркония извлекает из водных растворов ионы поливалентных металлов, в том числе свинца и висмута, ионы кремния, железа, марганца, сурьмы. Применяется для очистки от продуктов распада радона и альфа-излучающих радионуклидов.

Экспериментальное исследование

Для определения гидродинамического сопротивления исследуемых образцов была спланирована серия экспериментальных исследований течения через слой сорбента на установке, показанной на рис. 1. Целью экспериментального исследования было получение зависимости гидродинамического сопротивления слоя от скорости течения воды через слой.

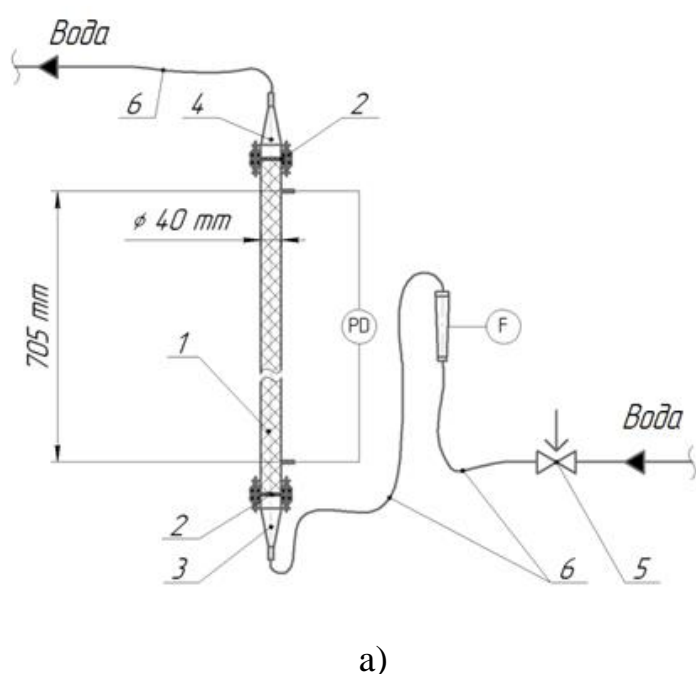


Рисунок 1 – Экспериментальная установка: а) схема установки; б) фотография колонны; 1 – колонна с сорбентом; 2 – фильтры; 3 – входная камера; 4 – выходная камера; 5 – регулирующий клапан; 6 – гибкие трубопроводы; PD – дифференциальный манометр; F – расходомер

Поток жидкости входит в колонну экспериментальной установки через входную камеру (3) с начальным давлением p_0 и проходит через слой сорбента. Сорбент размещается внутри колонны и удерживается фильтрами (2), установленными с обоих концов слоя сорбента. При прохождении потока через слой сорбента его давление снижается из-за сопротивления среды и принимает значение p_1 . Значение перепада давления на входе и выходе из слоя сорбента регистрируется дифференциальным манометром (PD). В данной серии

экспериментов использовался цифровой манометр НТ-1890, обладающий инструментальной погрешностью 0,3%. Скорость потока регулируется с помощью клапана (5). Расход жидкости, прошедшей через колонну, измеряется с помощью ротаметра LZS-15.

С каждым сорбентом экспериментальное исследование проводилось пять раз с одинаковым расходом жидкости для определения погрешности измерения. После проведения необходимого количества измерений расход жидкости увеличивался на 10 л/ч. В ходе выполнения эксперимента были получены результаты, представленные на рисунке 2.

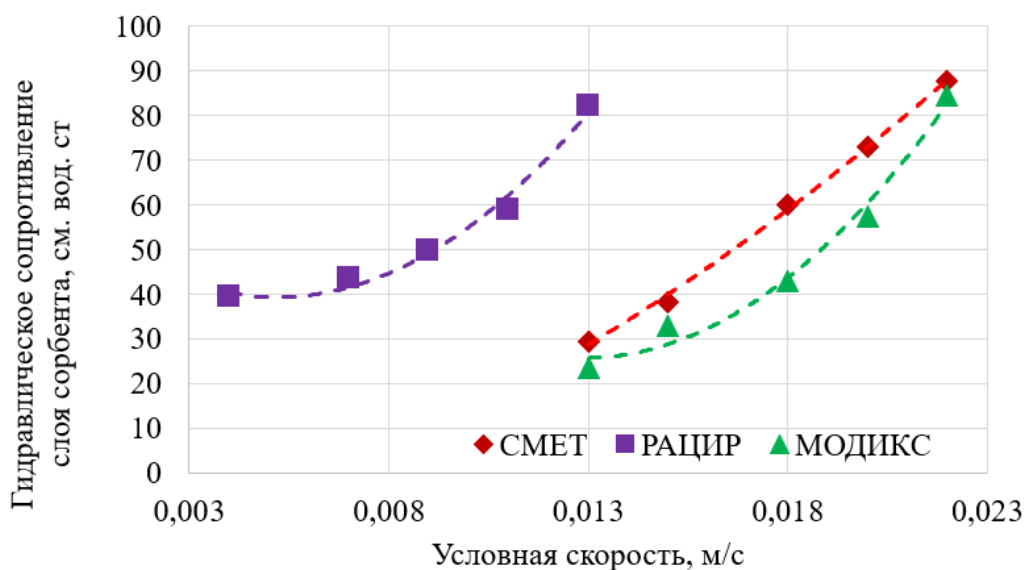


Рисунок 2 – Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления слоя сорбентов

Из результатов эксперимента видно, что гидравлическое сопротивление слоя увеличивается по квадратичной зависимости от скорости потока, что согласуется с уравнением Эргуна (12).

По графику можно заметить, что интервал скоростей для сорбента «РАЦИР» отличается от других сорбентов. Это связано с низкой порозностью сорбента, следствием чего стало высокое гидравлическое сопротивление слоя. Измеряемый перепад давления превышал предел измерения манометра, поэтому было необходимо снизить скорость течения.

Моделирование течения через пористую среду

В программном комплексе SolidWorks Flow Simulation пористая среда моделируется как распределенное по объему сопротивление течению. Для создания корректной модели нужно задать для слоя тип проницаемости,

порозность и зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от параметров течения (перепада давления в слое, скорости или расхода жидкости, линейных размеров слоя, размера поры и других). Можно выбрать комбинацию параметров, наилучшим образом подходящую для условий конкретного моделирования.

Значение гидродинамического сопротивления в программном комплексе вычисляется по формуле:

$$k = -\frac{grad(p)}{\rho \cdot w}, \quad (15)$$

Коэффициент k задается в виде эмпирической зависимости перепада давления от скорости потока.

Получить характеристики сопротивления пористой среды можно двумя способами.

Первый – создать твердотельную модель небольшой части слоя частиц и рассчитать характеристики течения через этот слой с помощью Flow Simulation. Этот способ подходит для регулярных слоев из элементов правильной формы, что было подтверждено в при моделировании течения через слой шаровых элементов. Однако для слоя частиц неправильной формы невозможно точно воспроизвести все элементы и их взаимное расположение. Приведенный на рис. 3, а пример моделирования служит скорее для понимания механизма течения в слое.

Так как моделирование обтекания отдельных частиц не позволяет получить необходимые характеристики слоя, для построения модели слоя использовался второй способ – на основе данных, полученных авторами в ходе экспериментального исследования, описанного выше. Для каждого варианта сорбента задавался в виде табличной зависимости перепад давления при разных скоростях течения. Модель слоя для этого случая показана на рис. 3, б. Слой моделируется как сплошной твердотельный элемент с заданной проницаемостью.

Результаты и их обсуждение

По полученным в результате эксперимента данным были построены модели пористых слоев сорбента, проведено моделирование течения воды через исследуемые сорбенты. В результате моделирования были определены значения разности давления потока до и после слоя сорбента. Полученный перепад давления характеризует гидравлическое сопротивление слоя.

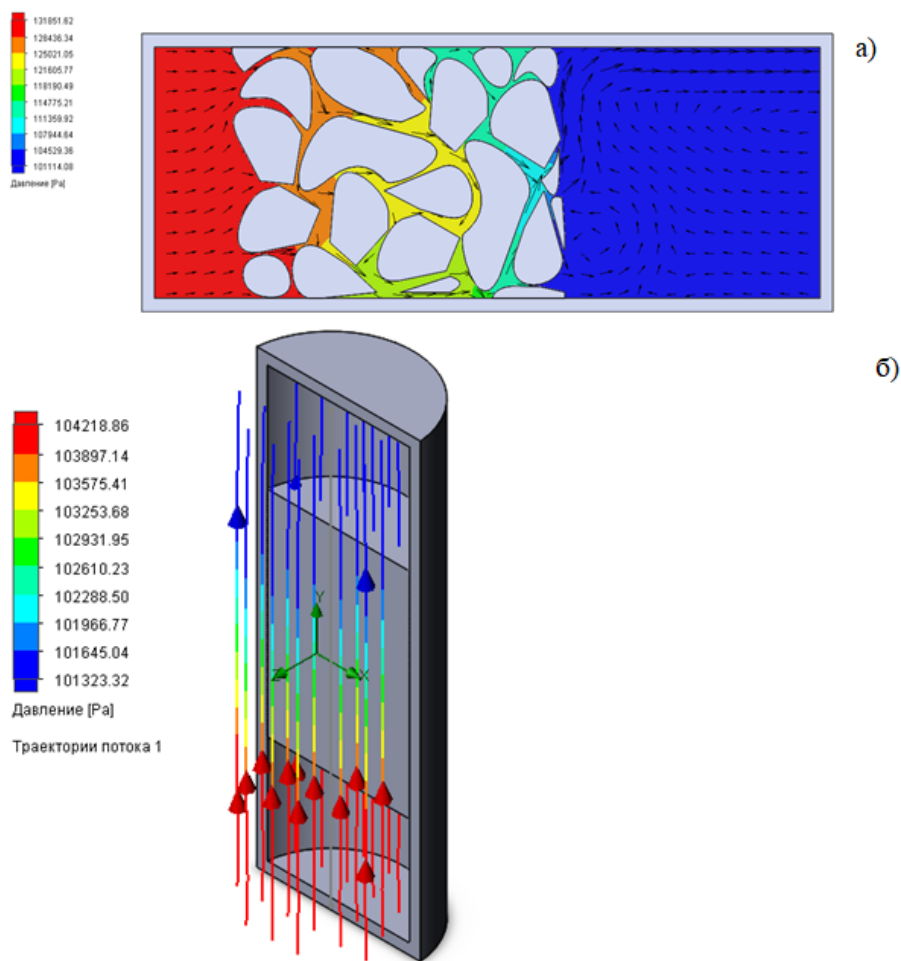


Рисунок 3 – Типы моделирования течения жидкости через пористые среды:

- а) отрисовка отдельных элементов слоя сорбента;
- б) моделирование течения среды через пористый слой, заданный по результатам эксперимента

Было проведено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов, описанных в данной работе (табл. 3).

Расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования не превышает 2,5%, что свидетельствует о том, что данный подход можно использовать для моделирования устройств, конструкция которых включает в себя насыпной слой. К таким устройствам, например, относятся фильтр-контейнеры для улавливания радионуклидов из жидких радиоактивных отходов. Полученные результаты позволят создать расширенную твердотельную модель радионуклидной ловушки и провести оптимизацию конструкции и режимов эксплуатации установки. Это в свою очередь приведёт к более эффективному использованию фильтр-контейнеров, тем самым будут снижены экономические затраты при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Таблица 3 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования

Сорбент «СМЕТ»					
Расход, л/ч	60	70	80	90	100
Расхождение, %	0,215	0,053	0,250	0,243	0,251
Сорбент «РАЦИР»					
Расход, л/ч	20	30	40	50	60
Расхождение, %	0,386	0,230	0,237	0,227	0,247
Сорбент «МОДИКС»					
Расход, л/ч	60	70	80	90	
Расхождение, %	0,169	0,260	0,158	2,16	

Заключение

С помощью экспериментального исследования была получена зависимость гидродинамического сопротивления различных сорбентов от скорости потока через слой. Полученные данные положены в основу компьютерной модели, которая позволит провести моделирование различных компоновок устройств для ионоселективной очистки с целью выявления оптимального варианта их конструкции.

Библиографический список

1. Новиков Г. А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии : учебник / Г. А. Новиков, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с. – ISBN 978-5-7996-2125-4.
2. НП–093–14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения : в ред. приказа Ростехнадзора от 17 нояб. 2017 г. № 481. – Москва : НТЦ ЯРБ, 2017. – 36 с.
3. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А. И. Бельтюков, А. И. Арпенко, С. А. Полуяктов [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 548 с.
4. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС / О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин, В. И. Булатов, А. Г. Шастин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 55–60.
5. Ташлыков О. Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация : монография / О. Л. Ташлыков. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH, 2011. – 232 с.

6. Ташлыков О. Л. Ремонт оборудования атомных станций : учебник / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с. – ISBN 978-5-7996-2381-4.
7. Aniskin Y. N. Technical-economic assessment of low-cobalt content in structural materials // IAEA-TECDOC-667. Coolant technology of water cooled reactors / Y. N. Aniskin, Y. A. Khitrov. – 1992. – Vol. 3 : Activity transport mechanisms in water cooled reactors. – P. 151–154.
8. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН–350, –600 / Ю. В. Носов, А. В. Ровнейко, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 4. – С. 195–199.
9. Кропачев Ю. А. Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации / Ю. А. Кропачев, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 119–130.
10. Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций / А. Э. Арустамов, А. В. Зинин, П. В. Красников [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 13–16.
11. Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС / В. П. Ремез, О. Л. Ташлыков, С. Е. Щеклеин [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 129–137.
12. Михайлова А. Ф. Пути реализации принципа оптимизации в радиологической защите персонала / А. Ф. Михайлова, О. Л. Ташлыков // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 393–401.
13. Modeling of combined radiation protection when working with irradiation sources / V. Yu. Litovchenko, N. A. Vasutin, A. V. Kozlov [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2313. – P. 020010.
14. Simulation method of the low-Re flows in the packed bed technological equipment / A. P. Khomyakov, S. Mordanov, A. S. Lavrov, D. I. Grinyov. – DOI 10.1088/1757-899X/899X/862/6/062020 // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – P. 062020.
15. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., доп. – Москва : Альянс, 2004. – 753 с.
16. Гидромеханические процессы. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов нефтегазопереработки / Д. Н. Жедяевский, В. Д. Косьмин, В. А. Лукьянов, С. С. Круглов. – Москва : РГУ нефти и газа, 2012. – 60 с.