

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВ-КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ

О.Л. Ташлыков, И.А. Бессонов, А.Д. Лезов, С.В. Чалпанов,

М.С. Смыков, Г.И. Скворцов, В.А. Климова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19*



Образование радиоактивных отходов (РАО) является специфической особенностью функционирования АЭС. Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при работе реакторных установок, дезактивации оборудования, помещений и спецодежды. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются $^{134,137}\text{Cs}$ в форме ионов и изотопы ^{60}Co , ^{54}Mn в форме комплексонов с веществами, которые используются для дезактивации оборудования. Среди известных методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции. Повысить эффективность использования объема фильтрующего материала можно при подаче очищаемой среды одновременно в несколько слоев сорбента. Проведено компьютерное моделирование трех предложенных вариантов усовершенствованных конструкций фильтра-контейнера для ионоселективной очистки, отличающихся способами как разделения потоков очищаемой воды, так и их подвода к слоям сорбента. Оценка повышения эффективности сорбционных процессов в предлагаемых конструкциях проводилась с использованием компьютерного моделирования в SolidWorks Flow Simulation.

Для исследования использовались три сорбента НПП «Эксорб». Для определения гидравлического сопротивления исследуемых образцов была проведена серия экспериментальных исследований течения через слой сорбента. Полученные экспериментальные данные были добавлены в инженерную базу данных Solidworks Flow Simulation для проведения моделирования представленных ранее конструкций. По результатам моделирования были получены характерные параметры течения потока в полости фильтров-контейнеров.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, жидкие радиоактивные отходы, ионоселективная очистка, сорбенты, фильтр-контейнер, оптимизация радиационной защиты, гидравлическое сопротивление, порозность, компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Образование радиоактивных отходов (РАО) является специфической особенностью функционирования АЭС. Поэтому решение проблемы экологически безопасного обра-

© *О.Л. Ташлыков, И.А. Бессонов, А.Д. Лезов, С.В. Чалпанов, М.С. Смыков,
Г.И. Скворцов, В.А. Климова, 2022*

щения с РАО наряду с обеспечением безопасной эксплуатации АЭС является основным условием приемлемости атомной энергетики как надежного низкоуглеродного источника, способного обеспечить 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 [2], которые установлены нормативным документом НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения». В соответствии с требованиями НП-093-14 была откорректирована основная часть нормативной базы и изменены требования к созданию комплексов по переработке твердых (ТРО) и жидких (ЖРО) радиоактивных отходов. Ранее степень переработки РАО была невелика, объем перерабатываемых отходов определялся наличием установок на предприятии. В настоящее время при создании комплексов переработки РАО учитываются объемы как образующихся (эксплуатационных) РАО, так и объемы накапливающихся при продлении сроков эксплуатации и вывода из эксплуатации ОИАЭ [3].

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) образуются при эксплуатации и снятии с эксплуатации реакторных установок (поддержание водно-химического режима, дезактивации оборудования и т.д.) [4, 5]. Основными радионуклидами в кубовых остатках являются $^{134, 137}\text{Cs}$, ^{60}Co , ^{54}Mn . Для изотопов цезия характерна ионная форма нахождения. 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. Из ^{59}Co образуется ^{60}Co с высокой энергией гамма-квантов (~ 1,2 МэВ) и большим периодом полураспада ($T_{1/2} = 5,272$ г.). Кобальт-60 и цезий-137 определяют радиационный фон при демонтаже выводимых из эксплуатации блоков АЭС, после останова и длительной выдержки [6].

Таблица 1

Характеристики 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

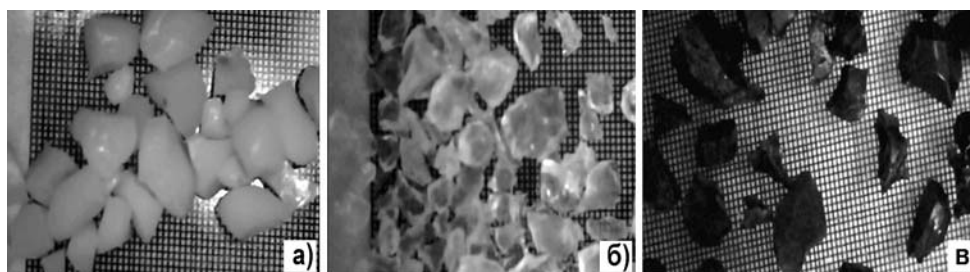


Рис. 1. Микрофотография частиц сорбентов: а) – СМЕТ; б) – РАЦИР; в) – МОДИКС. Размер масштабной сетки 0,1 мм

Основной задачей при обращении с ЖРО является окончательная изоляция кондиционированных РАО. Среди методов кондиционирования наибольшее сокращение объемов ЖРО происходит при селективной сорбции (табл. 1, рис. 1). Это позволяет скон-

центрировать радионуклиды в небольшом объеме сорбента [7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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). Нахождение кобальта и марганца в комплексной, а потому в несорбируемой форме определяет необходимость разрушения комплексов для решения проблемы выделения этих радионуклидов из растворов. Для этого предусмотрена стадия озонирования. Кроме того органические соединения, присутствующие в кубовом остатке, снижают ресурс ферроцианидных сорбентов цезия [8].

Концепция обращения с ЖРО, базирующаяся на технологии их ионоселективной очистки от радионуклидов, реализована на Кольской АЭС в рамках комплекса переработки ЖРО, который был введен в эксплуатацию поэтапно в 2006 – 2009 гг. [9].

Эксплуатируемые и сооружаемые комплексы по обращению с РАО на АЭС РФ используют современные технологии, обеспечивающие безопасное обращение с РАО на всех этапах, начиная с процессов сбора до переработки и получения конечной упаковки для передачи Национальному оператору. Одним из реализуемых в настоящее время проектов является комплекс переработки ЖРО (КП ЖРО) Белоярской АЭС для получения отвержденных РАО, отвечающих критериям приемлемости. Одной из трех технологических линий КП ЖРО будет блочно-модульная установка ионоселективной очистки (УИСО) для переработки кубовых остатков из баков хранилищ ХЖО-1 и ХЖО-2 [10].

Для трудноозонируемых ЖРО, содержащих прочные комплексоны кобальта с этилендиаминтетрауксусной кислотой, специалистами НПП «ЭКСОРБ» разработана технология очистки без стадии озонирования с использованием специальных сорбентов. Эксперименты, проведенные на Кольской АЭС в 2016 г., показали хорошие результаты [8].

Важным условием реализации данной технологии является оптимизация радиационной защиты при размещении кондиционированных ЖРО в контейнерах [11 – 13].

Важной характеристикой эффективности метода ионоселективной очистки является использование максимально возможной части всего объема сорбента при очистке ЖРО. В существующих конструкциях фильтров наблюдается неравномерность сорбции радионуклидов по мере движения очищаемой среды через объем сорбента, эффективность фильтрации значительно снижается.

При использовании односекционных фильтров эффективность очистки всегда ниже 100%, т.е. меньше термодинамической емкости. Это, в основном, объясняется кинематическими факторами. Для повышения эффективности в литературе предлагаются различные способы, например, в [14] предложено решение путем разбиения слоя сорбента на секции. После достижения максимальной насыщенности первой секцией (которая наступает быстрее последующих) она удаляется, вторая секция становится первой, а секция, наполненная чистым сорбентом, ставится последней по ходу очищаемой среды. Так замена односекционного фильтра на двухсекционный приводит к тому, что защитное время увеличивается на 64%.

Повысить эффективность использования объема фильтрующего материала можно при подаче очищаемой среды одновременно в несколько слоев сорбента, увеличивая тем самым площадь контакта среды с сорбентом. В качестве примера аналогичного конструкционного решения можно привести совершенствование ловушек цезия в форме ТВС от конструкции с одним слоем графита для БОР-60 до конструкции ловушки МАВР с одновременным подводом натрия к четырем слоям (для БН-350, БН-600) [15].

Для проведения исследований были разработаны три варианта конструкций фильтров-ловушек. В первом предлагаемом варианте использована схема подвода очищаемой

среды, аналогичная ловушке цезия МАВР (рис. 2а). Очищаемая среда поступает снизу и распределяется по слоям сорбента с помощью подводящих трубок, установленных внутри слоев. После фильтрации среда покидает слой сорбента с помощью отводящих трубок.

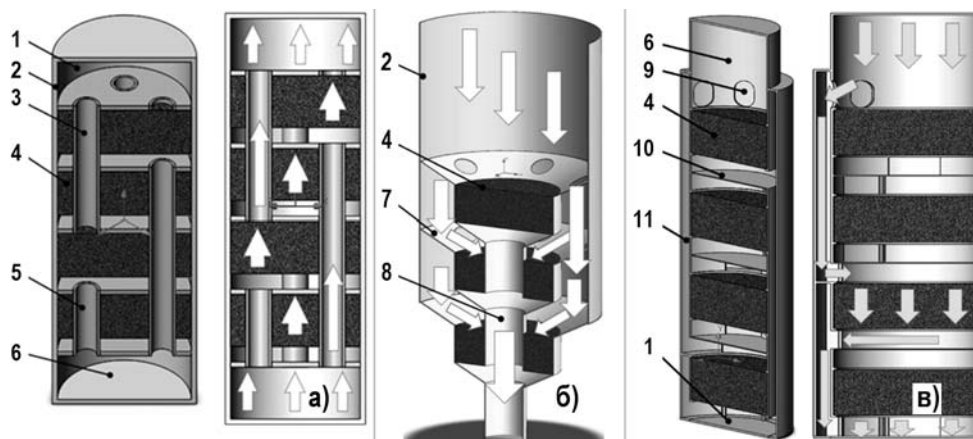


Рис. 2. Конструкции ловушек: а) – способ использования трубок; б) – способ использования распределительных колец; в) – способ разделения потока вне корпусного; 1 – сточный коллектор; 2 – корпус; 3 – отводящая трубка; 4 – слой сорбента; 5 – подводящая трубка; 6 – подводной коллектор; 7 – перфорированные кольца; 8 – сливной канал; 9 – перфорированные стенки разделения потока; 10 – перегородки; 11 – разводящие каналы

При прохождении среды в данной конструкции возникает значительное местное сопротивление при входе в распределительные трубки. Для минимизации этих сопротивлений была предложена конструкция с использованием перфорированных колец (рис. 2б). В этом варианте среда поступает в фильтр сверху и, подходя к первому слою, разделяется с помощью перфорированного кольца. То же самое происходит и с последующими слоями. После прохождения слоев сорбента среда поступает в общий сливной канал. Преимуществом данной конструкции является возможность изменения количества слоев сорбента.

В качестве третьего варианта рассматривалась конструкция, в которой распределительные трубки были вынесены за пределы корпуса фильтра-контейнера (рис. 2в). Преимущество этой модели по сравнению с первым вариантом конструкции – более низкое гидравлическое сопротивление в отводящих каналах за счет увеличения площади проходного сечения каналов. В данной конструкции среда подается сверху и распределяется по четырем направлениям. Подвод среды к слоям осуществляется через задние распределительные каналы.

Для исследования были выбраны три марки сорбента (СМЕТ, РАЦИР и МОДИКС) НПП «Эксорб» (см. табл. 1), занимающего ведущее место в производстве сорбентов для ионселективной очистки в России и мире [16].

Как видно, все три марки сорбентов различаются по форме частиц и значению порозности (отношению объема пор к объему всего слоя). 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.

Для определения гидравлического сопротивления исследуемых образцов сорбента была проведена серия экспериментальных исследований течения [17 – 20].

Целью исследования было получение зависимости гидравлического сопротивления слоя сорбента от скорости течения воды. Принцип работы экспериментальной установки (рис. 3) заключается в следующем: поток с начальным давлением P_0 поступает в колонну через входную камеру и проходит через слой сорбента. Сорбент внутри колон-

ны удерживается фильтрами, установленными снизу и сверху слоя сорбента. При прохождении потока через слой сорбента его давление снижается из-за сопротивления среды до значения 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, имеющий инструментальную погрешность 0,3%. Скорость потока регулируется с помощью клапана 5. Расход жидкости F , проходящей через колонну, измеряется с помощью ротаметра серии «LZS-15».

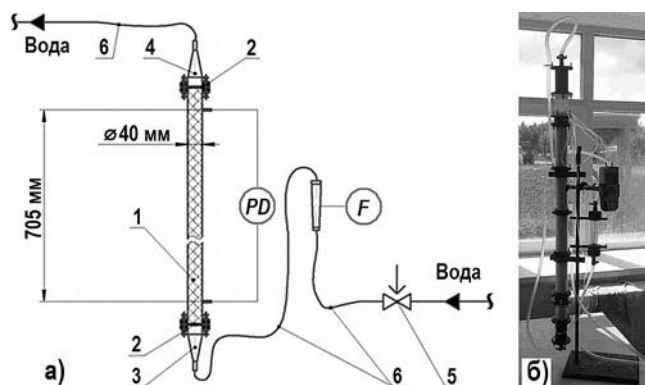


Рис. 3. Экспериментальная установка: а) – схема; б) – фотография колонны; 1 – колонна с сорбентом; 2 – фильтры; 3 – входная камера; 4 – выходная камера; 5 – регулирующий клапан; 6 – гибкие трубопроводы; PD – дифференциальный манометр; F – расходомер

Экспериментальные исследования для каждой марки сорбента проводилось по пять раз с одинаковым расходом жидкости для определения погрешности измерения. После проведения необходимого количества измерений расход жидкости увеличивался на 10 л/ч.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Flow Simulation – это встроенный в программный пакет SolidWorks модуль вычислительной гидродинамики (CFD). Flow Simulation выполняет общее параметрическое моделирование потока на основе метода конечных элементов. Моделирование позволяет рассчитывать гидродинамические характеристики и условия теплообмена в изотермических и неізотермических турбулентных и ламинарных потоках в отсутствие фазовых переходов и химических превращений. В том числе с помощью Flow Simulation можно моделировать течение в пористых средах.

Flow Simulation является средством решения различных задач. Данный модуль позволяет моделировать течения жидкостей и газов, использовать типовые физические модели жидкостей и газов; проводить тепловой расчет, гидродинамические и тепловые модели технических устройств. Flow Simulation активно используется другими пользователями для нахождения ответов по поставленным проблемам [21].

При моделировании течения жидкости или газа в пористой среде Flow Simulation рассматривает пористую засыпку как твердое тело с двумя характеристиками – порозностью, равной отношению объемов соединенных между собой пор к объему всего тела, и проницаемостью, которая задается в виде гидравлического сопротивления $k = -\text{grad}(P)/(\rho v)$, где P – давление; ρ – плотность текучей среды; v – ее скорость.

Зависимость коэффициента проницаемости от скорости или расхода пользователь задает в виде таблицы. Характеристики вводятся в систему для пористого тела прямоугольной или цилиндрической формы, а затем при расчете автоматически перестраиваются на геометрию модели. Если характеристики пористого тела были получены для жидкости, отличной от текучей среды проекта, то вводится дополнительно калибровочная вязкость, если коэффициент k при постоянных расходе и перепаде давления зави-

сит от вязкости жидкости, или калибровочная плотность, если коэффициент сопротивления k пропорционален плотности текучей среды.

В исходной инженерной базе Flow Simulation приведено всего несколько пористых тел – фильтры из металлической сетки, поролоновые фильтры и т. п. Для анализа течения в конкретной пористой среде нужно определить характеристики этой среды. Здесь существуют два подхода. Если поры образуют регулярную структуру, то можно создать твердотельную модель, отражающую геометрию пористого тела, и с помощью методов вычислительной гидродинамики определить необходимые характеристики. Если такое моделирование невозможно, то характеристики пористого тела определяют в натурном эксперименте.

Полученные в результате эксперимента данные для всех марок сорбентов были добавлены в инженерную базу данных Solidworks Flow Simulation для использования в гидродинамическом моделировании предлагаемых конструкций фильтров-ловушек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью экспериментального исследования было получение зависимости гидравлического сопротивления слоя сорбента от скорости течения воды. В ходе выполнения эксперимента были получены результаты, представленные на рис. 4.

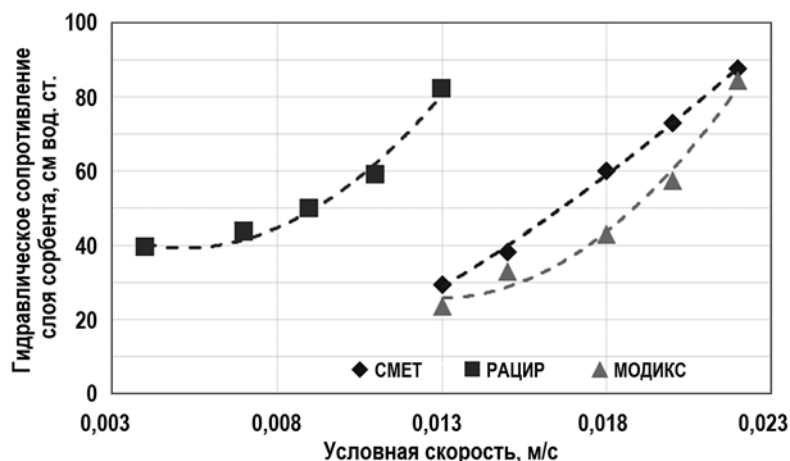


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления слоя сорбентов

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

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

На рисунке 5а приводятся результаты моделирования процесса течения потока в первом варианте конструкции в виде поля давлений и векторов скорости. В данном фильтре-контейнере среда со скоростью 0,2 м/с поступает снизу и распределяется между подводными к разным слоям сорбента трубками. Из рисунка видно, что основной вклад в сопротивление течению вносит слой сорбента. Местные сопротивления, возникающие вследствие течения через распределяющие трубки, незначительны по сравнению с сопротивлением слоя. Суммарный перепад давлений на входе в конструкцию и на выходе из фильтра-контейнера составил примерно 390 кПа.

Результаты моделирования для второго варианта представлены на рис. 5б. Здесь среда подается сверху вниз, часть попадает в первый слой сорбента, остальное через

отверстия в перфорированных кольцах направляется в следующие секции. Недостатком данной конструкции является возникновение дополнительного местного сопротивления при прохождении потока через перфорированные кольца. Это проявляется в том, что во входной зоне каждого слоя сорбента образуется вихревое течение. Негативный эффект от вихревого течения помимо роста сопротивления заключается в возможности образования застойных зон в углах конструкции и интенсификации отложений на стенках. В целом конструкция с перфорированными кольцами имеет наибольшее суммарное гидравлическое сопротивление из рассмотренных вариантов (492 кПа).

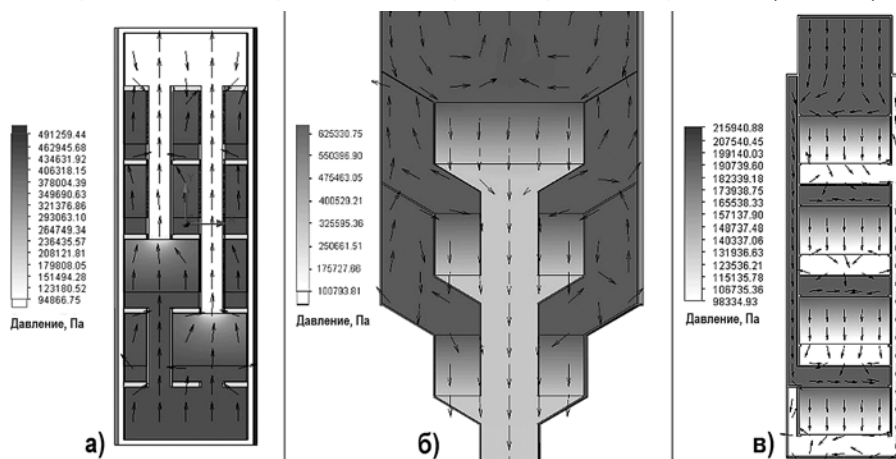


Рис. 5. Поле изменения давления в фильтре-контейнере: а) – вариант 1; б) – вариант 2; в) – вариант 3

На рисунке 5в отображены результаты моделирования третьего варианта конструкции. Направление текущей среды – сверху вниз, из раздаточного бокового коллектора (на рисунке справа) среда равномерно распределяется по слоям сорбента, а затем после очистки направляется в приемный боковой коллектор (слева). Перепад давлений между входным и выходным сечением конструкции составил 115 кПа. Основной вклад в сопротивление также вносят слои сорбента. Благодаря тому, что разводящие трубки вынесены за пределы корпуса, удалось снизить значение гидравлического сопротивления.

Все рассмотренные варианты имели одинаковую площадь поперечного сечения и высоту слоев сорбента. С точки зрения эффективности распределения текущей среды между слоями сорбента устройства не имеют существенных различий, потому что, как показало моделирование, во всех вариантах расход среды распределялся по слоям примерно поровну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью экспериментального исследования была получена зависимость гидравлического сопротивления различных сорбентов от скорости потока через слой. Полученные данные положены в основу компьютерной модели. Предложены три варианта конструкций ловушек с повышенной эффективностью сорбционных процессов. Результаты моделирования показали, что третий вариант конструкции обладает наименьшим гидравлическим сопротивлением. Проведенные расчеты относятся к гидродинамическим. В них не рассматривается химическое взаимодействие фильтруемой среды с сорбентом.

Литература

1. Новиков Г. А., Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии: учебник. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 552 с.
2. Tashlykov O.L., Khomyakov A.P., Mordanov S.V., Remez V.P. Ion-selective treatment as a method for increasing the efficiency of liquid radioactive waste reducing in accordance

with acceptance criteria for disposal. // AIP Conf. Proc. – 2021, 2388(1):020032. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0068413>.

3. *Адамович Д.В. и др.* Современные подходы к комплексам переработки и кондиционирования РАО для вновь строящихся АЭС. // Докл. XI Межд. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018. – С. 276-279.

4. *Ташлыков О.Л. и др.* Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС: учебник. / В 2-х кн. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – Кн.1. – 256 с.

5. *Nosov Yu. V., Rovneiko A. V., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E.* Decommissioning Features of BN-350, -600 Fast Reactors. // Atomic Energy. – 2019. – Vol. 125. – Iss. 4. – PP. 219-223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00470-z>.

6. *Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е.* Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 119-130. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2019.1.11>.

7. *Арустамов А.Э. и др.* Метод ионоселективной очистки жидких радиоактивных отходов атомных станций. // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 11. – С. 13-16.

8. *Ремез В.П. и др.* Повышение эффективности локализации радионуклидов кобальт-60 и цезий-137 из жидких радиоактивных отходов в решении проблемы обеспечения радиационной безопасности АЭС. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – Т. 7. – № 2. – С. 129-137. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562916020135>.

9. *Авезниязов С.Р., Стахов М.Р.* Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС. // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4 (5). – С.49-54.

10. *Булатов В.И., Ташлыков А.О., Ташлыков О.Л.* Сооружение комплекса переработки жидких радиоактивных отходов на Белоярской АЭС. // Межд. научн. журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2020. – № 25-27 (347-349). – С. 62-72.

11. *Litovchenko V. Yu. et al.* Modeling of combined radiation protection when working with irradiation sources. // AIP Conf. Proc. – 2020. – 2313, 020010. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0033620>.

12. *Mikhailova A. F., Tashlykov O. L.* The Ways of Implementation of the Optimization Principle in the Personnel Radiological Protection. // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83. – No. 12. – PP. 1718-1726. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778820100154>.

13. *Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю. и др.* Оптимизация состава радиационной защиты. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 36-42.

14. *Веницианов Е. В.* Многослойные и многосекционные фильтры – способы повышения эффективности сорбционных процессов. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2013. – Т. 13. – № 3. – С. 284-292.

15. *Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяктов С.А. и др.* Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. Ч. 1. / Под ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, – 2013. – 548 с.

16. *Khomyakov A. et al.* Research of the physical properties of the liquid radioactive waste treatment ion-selective sorbents. // AIP Conf. Proc. – 2021. – 2388(1): 040014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0068415>.

17. *Бессонов И.А. и др.* Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование гидродинамических характеристик сорбентов для ионоселективной очистки. / Сб. статей VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 46-58.

18. *Морданов С.В. и др.* Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления сорбентов для ионоселективной очистки ЖРО. / Сб. статей VIII Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации». – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 216-230.

19. *Бессонов И.А. и др.* Расчетно-экспериментальные исследования течения воды через насыпной слой сорбента при ионоселективной очистке. / Сб. материалов Научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследований к внедрению». – Нижний Новгород, 2021. – С. 25-26.

20. *Чалпанов С.В. и др.* Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования течения потока через насыпной слой сорбента. / Тез. докл. IV Международной (XVII Региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический

риск». Под общ. ред. А.А. Удаловой. – Обнинск, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 108-110.
21. *Аладьев А.П., Пахлян И.А., Юртов М.П.* Моделирование параметров работы струйного насоса в скважинных условиях (с применением программного продукта Solidworks Flow Simulation). / Тез. докл. II Международной научно-практической конференции «Наука и технологии в нефтегазовом деле». – Краснодар, 2020. – С. 215-218.

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

Авторы

Ташлыков Олег Леонидович, доцент, кандидат технических наук

E-mail: otashlykov@list.ru

Бессонов Илья Алексеевич, студент

E-mail: ilja.bessonov2014@yandex.ru

Лезов Артём Дмитриевич, студент

E-mail: cool.lezov@mail.ru.

Чалпанов Сергей Валерьевич, студент

E-mail: ChalpanovS@mail.ru

Смыков Максим Сергеевич, студент

E-mail: maks2001122@gmail.com

Скворцов Глеб Игоревич, студент

E-mail: gskvortcov@mail.ru

Климова Виктория Андреевна, старший преподаватель

E-mail: V.A.Klimova@urfu.ru

UDC 621.039

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDRODYNAMIC OPERATING CONDITIONS OF FILTER CONTAINERS FOR ION-SELECTIVE PURIFICATION

Tashlykov O.L., Bessonov I.A., Lezov A.D., Chalpanov S.V., Smykov M.S., Skvortsov G.I., Klimova V.A.

Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., 620002 Yekaterinburg, Russia

ABSTRACT

The generation of radioactive waste (RW) is a specific feature of NPP operation. Liquid radioactive waste (LRW) is generated during the operation of reactor facilities, decontamination of equipment, premises and overalls. The main radionuclides in the distillation residues are $^{134,137}\text{Cs}$ in the form of ions and isotopes ^{60}Co , ^{54}Mn in the form of complexons with substances that are used to decontaminate equipment. Among the known methods of conditioning, the largest reduction in the volume of LRW occurs with selective sorption. It is possible to increase the efficiency of using the volume of the filtering material by supplying the medium to be purified simultaneously into several layers of the sorbent. In the work, computer simulation of three proposed variants of improved designs of the filter container for ion-selective purification was carried out, which differ both in the ways of separating the flows of purified water and in the methods of their supply to the sorbent layers. All versions of the filter containers had the same cross-sectional area and height of the sorbent layers. Evaluation of the increase in the efficiency of sorption processes in the proposed designs was carried out using computer simulation in SolidWorks Flow Simulation.

Three sorbents of NPP Eksorb were used. To determine the hydraulic resistance of the

samples under study, a series of experimental studies of the flow through the sorbent layer was carried out. Experiments have shown that the hydraulic resistance of the layer increases in a quadratic dependence on the flow velocity, which is consistent with the Ergun equation. The obtained experimental data was added to the SolidWorks Flow Simulation engineering database to simulate the previously presented structures. Based on the simulation results, the characteristic parameters of the flow in the cavity of the filter containers were obtained.

Modeling showed that, in all variants, the flow rate of the medium was distributed approximately equally among the layers. It was revealed that the third design option has the least hydraulic resistance. The chemical interaction of the filtered medium with the sorbent was not considered in the calculations.

Key words: decommissioning, liquid radioactive waste, ion-selective treatment, sorbents, filter container, optimization of radiation protection, hydraulic resistance, porosity, computer simulation.

REFERENCES

1. Novikov G.A., Tashlykov O.L., Scheklein S.E. *Ensuring Safety in the Field of Nuclear Energy Use*. Ekaterinburg. UrFU Publ., 2017, 552 p. (in Russian).
2. Tashlykov O.L., Khomyakov A.P., Mordanov S.V., Remez V.P. Ion-Selective Treatment as a Method for Increasing the Efficiency of Liquid Radioactive Waste Reducing in Accordance with Acceptance Criteria for Disposal. *AIP Conf. Proc.* 2021, 2388(1):020032. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0068413>.
3. Adamovich D.V., Valov D.A., Zinin A.V., Matveev A.A. Modern Approaches to RW Processing and Conditioning Complexes for Newly Constructed Nuclear Power Plants. Proc. of the XI-th Intern. Conf. «Safety, Effectivity and Economics of Nuclear Power». Moscow. Kontsern Rosenergoatov JSC, 2018, pp. 276-279 (in Russian).
4. Tashlykov O.L., Kuznezov A.G., Arefjev O.N. *Operation and Repair of Nuclear Steam Generating Plants of Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1995. Part 1, 256 p. (in Russian).
5. Nosov Yu.V., Rovneiko A.V., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Decommissioning Features of BN-350, -600 Fast Reactors. *Atomic Energy*. 2019, v. 125, iss. 4, pp. 219-223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00470-z>.
6. Kropachev Yu.A., Tashlykov O. L., Scheklein S. E. Optimization of radiation protection at the stage of decommissioning of NPP power units. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 1, pp.119-130; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11> (in Russian).
7. Arustamov A.E., Savkin A.E., Zinin A.V. Method of Ion-Selective Purification of Liquid Radioactive Waste of Nuclear Power Plants. *Bezopasnost' Zhiznideyatelnosti*. 2005, no. 11, pp. 13-16 (in Russian).
8. Remez V.P., Tashlykov O. L., Scheklein S. E., Ioshin A.A., Kuznetsov S.B. Improving the Efficiency of Localization of Cobalt-60 and Cesium-137 Radionuclides from Liquid Radioactive Waste in Solving the Problem of Ensuring Nuclear Power Plant Radiation Safety. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2016, v. 7, no. 2, pp. 129-137 (in Russian).
9. Avezniyazov S.R., Stahiv M.R. Experience in Handling LRW at the Kol'skaya NPP. *Radioaktivnye Otkhody*. 2018, no. 4 (5), pp. 49-54 (in Russian).
10. Bulatov V.I., Tashlykov A. O., Tashlykov O. L. Construction of a Complex for Processing Liquid Radioactive Waste at the Beloyarsk NPP. *Mezhdunarodny Nauchnyj Zhurnal «Alternativnaya Energetika i Ekologiya»*. 2020, no. 25-27 (347-349), pp. 62-72 (in Russian).
11. Litovchenko V.Yu., Vasutin N.A., Kozlov A.V., Seleznev E.N. and Tashlykov O.L. Modeling of Combined Radiation Protection when Working with Irradiation Sources. *AIP Conf. Proc.* 2020, 2313, 020010: DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0033620>.
12. Mikhailova A.F., Tashlykov O.L. The Ways of Implementation of the Optimization Principle in the Personnel Radiological Protection. *Physics of Atomic Nuclei*. 2020, v. 83, no. 12, pp. 1718-1726; DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778820100154>.
13. Tashlykov O. L., Scheklein S. E., Luk'yanenko V.Y., Mikhailova A. F., Russkih I.M., Seleznev E.N., Kozlov A.V. Optimization of Radiation Protection Composition. *Izvestiya*

Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Yadernaya Energetika. 2015, no. 4, pp. 36-42 DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2015.4.04> (in Russian).

14. Venicialov E.V. Multilayer and Multi-Section Filters are Ways to Increase the Efficiency of Sorption Processes. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Processy*. 2013, v. 13, no. 3, pp. 284-292 (in Russian).

15. Bel'tyukov A.I., Karpenko A.I., Poluyaktov S.A., Tashlykov O.L., Titov G.P., Tuchkov A.M., Scheklein S.E. *Nuclear Power Plants with Fast Neutron Reactors with Sodium Coolant*. Ekaterinburg. UrFU Publ., 2013. Vol. 1. Pp. 548. (in Russian).

16. Khomyakov A., Mordanov S., Tashlykov O., Kostarev V., Litvinov D. Research of the Physical Properties of the Liquid Radioactive Waste Treatment Ion-Selective Sorbents. *AIP Conf. Proc.* 2021, 2388(1): 040014; DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0068415>.

17. Bessonov I.A., Chalpanov S.V., Lezov A.D., Tashlykov O. L., Klimova V.A., Mordanov S.V., Homyakov A.P., Remez V.P. Computer modeling and experimental study of hydrodynamic characteristics of sorbents for ion-selective purification. *Fizika. Tehnologii. Innovacii : sbornic statej VIII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii*. 2021. Pp. 46-58 (in Russian).

18. Mordanov S.V., Tashlykov O.L., Homyakov A.P., Remez V.P., Bessonov I.A., Chalpanov S.V. Experimental study of the hydraulic resistance of sorbents for ion-selective purification of LRW. *Proc. of the VIII-th Intern. Youthful Scientific Conf. «Fizika. Tekhnologii. Innovatsii. FTI-2021»*. Ekaterinburg. UrFU Publ., 2021, pp. 216-230 (in Russian).

19. Bessonov I.A., Chalpanov S.V., Lezov A.D., Tashlykov O. L., Mordanov S.V., Klimova V.A. Computational and Experimental Studies of Water Flow through a Bulk Sorbent Layer During Ion-Selective Purification. *Proc. of the Sci. and Pract. Conf. «Yadernye Tekhnologii: ot Issledovaniya k Vnedreniyu – 2021»*. N. Novgorod, 2021, pp. 25-26 (in Russian).

20. Chalpanov S.V., Bessonov I.A., Lezov A.D., Tashlykov O.L., Mordanov S.V., Klimova V.A. Computer Modeling and Experimental Studies of the Flow through the Bulk Sorbent Layer. *Proc. of the IV-th Intern. (VII-th Region.) Sci. Conf. «Tekhnogennye Sisyemy i Ekologicheskij Risk»*. Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MEFPI Publ., 2021, pp. 108-110 (in Russian).

21. Aladiev A.P., Pakhlyan I.A., Yurtov M.P. Modeling the Parameters of the Jet Pump in Downhole Conditions (Using the Software Product Solidworks Flow Simulation). *Proc. of the II-nd Sci. and Pract. Conf. «Science and Technology in the Oil and Gas Business»*. Krasnodar, 2020, pp. 215-218 (in Russian).

Authors

Tashlykov Oleg Leonidovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: otashlykov@list.ru.

Bessonov Iliya Alekseevich, Student

E-mail: ilja.bessonov2014@yandex.ru.

Lezov Artyom Dmitrievich, Student

E-mail: cool.lezov@mail.ru.

Chalpanov Sergey Valerievich, Student

E-mail: ChalpanovS@mail.ru.

Smykov Maksim Sergeevich, Student

E-mail: maks2001122@gmail.com.

Skvortsov Gleb Igorevich, Student

E-mail: gskvortcov@mail.ru.

Klimova Victoria Andreevna, Senior Lecturer

E-mail: V.A.Klimova@urfu.ru.