

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗАКТИВАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ

В. В. Шеленкова¹, Т. А. Кулагина²

¹ФГУП «Горно-химический комбинат», Красноярский край, Железногорск

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск

Статья поступила в редакцию 28 января 2021 г.

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности химических способов дезактивации поверхностей. Рассмотрены составы дезактивирующих растворов, наиболее часто используемых в настоящее время. Представлены численные данные, иллюстрирующие эффективность различных способов дезактивации. Показано, что дезактивация материалов дезактивирующими растворами, приготовленными с использованием воды после ее кавитационной обработки, более эффективна, чем при использовании растворов, приготовленных на основе необработанной воды. Изложены основные результаты исследований по дезактивации загрязненного оборудования. Установлена зависимость эффективности процесса дезактивации от времени обработки загрязненной поверхности дезактивирующим раствором на основе кавитационно-активированной воды, которая сопоставима с результатами дезактивации щелочным раствором.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, дезактивация, радиоактивное загрязнение, дезактивирующий раствор, кавитационная обработка, коэффициент дезактивации.

Введение

Совершенствованием технологий дезактивации оборудования и средств индивидуальной защиты при эксплуатации объектов использования атомной энергии, при добыче и переработке природных ископаемых (нефти, газа, цветных металлов и т. п.) заняты во многих странах [1–9].

Эти задачи тесно связаны с решением проблем обращения с радиоактивными отходами (РАО) в рамках общей стратегии развития атомной энергетики до 2025 года [10–13].

Высокие тарифы на захоронение радиоактивных отходов делают экономически неразрешимой задачу прямого захоронения всех РАО без предварительной их дезактивации или уменьшения их количества. В то же время

представляет существенный интерес повторное использование высококачественного металла после его дезактивации.

Кроме того, уровень поверхностного загрязнения рабочих поверхностей оборудования определяет условия работы персонала [7]. Поэтому для исключения дополнительных источников облучения персонала, образования радиоактивных аэрозолей и разноса радиоактивных загрязнений необходимо своевременно проводить дезактивацию загрязненных радиоактивными веществами поверхностей [8, 9]. Преодоление сложившейся ситуации возможно с использованием дезактивирующих растворов на основе воды, обработанной с помощью эффектов кавитации – кавитационной технологии [5, 14–19].

В данной статье представлены результаты работ по совершенствованию технологии дезактивации оборудования с использованием эффектов гидродинамической кавитации.

Анализ существующих методов дезактивации поверхностей с радиоактивным загрязнением

Источником радиоактивного загрязнения при добыче нефти/газа являются природные радионуклиды ^{226}Ra , ^{232}Th и продукты их распада. В атомной отрасли радиоактивное загрязнение в основном обусловлено изотопами урана и плутония, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{60}Co .

Теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов дезактивации посвящены работы многих исследователей [20–25]. Наиболее распространенными являются химические методы дезактивации с использованием дезактивирующих растворов. При их проведении происходит разрушение связи загрязнения с поверхностью, поверхность освобождается от радиоактивного загрязнения, а радиоактивное вещество переходит в дезактивирующий раствор [20]. Основные компоненты дезактивирующих растворов — вода, поверхностно-активные и комплексообразующие вещества, кислоты, щелочи и некоторые соли. В большинстве случаев используют сложные растворы, состав которых выбирают с учетом сил, удерживающих загрязняющее вещество на поверхности. Хороший эффект часто дает поочередное использование различных растворов, например, кислого и щелочного, окислительного и восстановительного [26, 27].

Возможность применения поверхностно-активных веществ (ПАВ) в качестве дезактивирующих растворов обусловлена снижением поверхностного натяжения и адсорбции на границе раздела фаз. Способность удерживать радиоактивные загрязнения в растворе и обеспечивать удаление их с обрабатываемой поверхности обусловлена целым комплексом коллоидно-химических свойств, связывающих радионуклид, находящийся в растворе в виде ионов. В качестве комплексообразующих веществ в состав дезактивирующих растворов вводят хелатные соединения, такие как этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) и ее натриевую соль [21].

В дезактивирующие растворы добавляют также конденсированные фосфаты или полифосфаты, которые образуют комплексные соединения с катионами щелочноземельных и тяжелых металлов. К числу таких комплексообразователей относятся: дифосфат (пирофосфат) натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), триполифосфат натрия ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$), тетрафосфат натрия ($\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$) и гексаметафосфат

натрия (ГМФН), которые являются высокомолекулярными соединениями, содержащими 34–38 групп (NaPO_3)_n. Помимо комплексообразующих свойств, конденсированные фосфаты дополнительно сообщают дезактивирующим растворам суспензирующие свойства, усиливая тем самым коллоидно-химические действия ПАВ. В дезактивирующие растворы вводят некоторые органические и неорганические добавки, выполняющие роль активаторов моющего процесса. Неорганические электролиты регулируют pH раствора, повышают адсорбцию ПАВ, снижают его критическую концентрацию мицеллообразования, тем самым уменьшают расход [22].

Примером использования дезактивирующих растворов служат способы погружной дезактивации и дезактивации растиранием раствора [12, 13]. Погружная дезактивация, благодаря своей простоте и эффективности, является одним из наиболее широко используемых на практике способов. Он заключается в погружении загрязненного изделия в ванну с дезактивирующим раствором. Этим способом можно обрабатывать изделия различной конфигурации и размеров, эффективность погружной дезактивации возрастает при перемешивании, циркуляции раствора, повышении температуры [28, 29]. Метод используется для дезактивации съемного контурного оборудования, оснастки, арматуры, инструментов. При дезактивации крупногабаритного оборудования (парогенераторов, теплообменников, больших емкостей) их заполняют дезактивирующим раствором, организуя его циркуляцию и подогрев. Недостаток этого метода — большой расход дезактивирующего раствора и, как следствие, большой объем образующихся жидких радиоактивных отходов (ЖРО) [30].

При дезактивации растиранием сочетается дезактивирующее действие раствора и механическое воздействие — простой, универсальный и распространенный способ. Согласно [20] расход раствора составляет порядка 2–3 л/м². Для нержавеющей стали коэффициент дезактивации составляет 5–20. Недостаток — применение ручного труда в радиационно опасных условиях.

Для интенсификации процесса химической дезактивации может быть использован ультразвук, который ускоряет процесс дезактивации металлических материалов [23], позволяя достичь достаточно высокой эффективности обработки за сравнительно короткое время, благодаря чему снижаются объемы вторичных ЖРО. Однако прочно фиксированные загрязнения, особенно продиффундировавшие вглубь основного металла, удаляются плохо, даже при использовании агрессивных растворов.

Помимо химических способов дезактивации, также используются физико-механические и физико-химические методы [31–35]. В ходе механической обработки удаляется поверхностный слой материала с содержащимися в нем радиоактивными загрязнениями.

К физико-химическим методам относят электрохимическую дезактивацию, дезактивацию пастами, расплавами и съемными покрытиями, порошкообразными металлизированными составами и др.

Развитие теории кавитационного воздействия на водные системы

Модифицированная в результате гидромеханической обработки (или, как ее называют, активированная) вода способна интенсифицировать ряд технологических процессов [14, 15]. Здесь под термином «активированная вода» будем иметь в виду общепринятое понятие активной среды, т. е. вещества, в котором распределение частиц (атомов, молекул, ионов) по энергетическим состояниям не является равновесным и хотя бы для одной пары уровней энергии осуществляется инверсия населенности.

Активация твердых и жидких систем, приводящая к изменению их физических и химических свойств, реакционной способности, дефектной (примесной) структуры и т. п., может быть осуществлена различными внешними воздействиями: слабыми и сильными. К таким воздействиям можно, в частности, отнести механическую, магнитную, ультразвуковую обработку, радиационное воздействие (например, облучение гамма-квантами и ионными пучками), а также термообработку. Методы активации можно подразделить на те, при которых образцы разрушаются в целом (диспергация), и те, при которых изменяется только дефектная структура.

Исследования гидромеханической обработки воды (как достаточно сильного воздействия) показали, что ее последующая активность проявляется как в макромасштабе, так и на микроуровнях (на молекулярном и субмолекулярном). Суть гидродинамического воздействия может быть сведена к действию двух механизмов: распространению ударных волн вблизи схлопывающегося кавитационного микропузырька и ударному действию кумулятивных микроструек при несимметричном коллапсе кавитационных микропузырьков. Причем в данном контексте способ получения кавитационных микропузырьков не имеет значения. Этим основным механизмам сопутствует повышение температуры и давления вблизи пузырька, делая локальную

область около него уникальным реактором для проведения различных реакций и процессов. Предварительные результаты работы в этом направлении частично обобщены в монографиях [15–17]. В работах [14, 15] рассмотрена краевая задача сопряжения для парогазового пузырька в жидкости, позволяющая путем детальных расчетов определить все особенности развития пузырька из зародыша до его схлопывания у твердой стенки. Там же на базе этой задачи рассмотрен частный случай для сферического пузырька в неподвижной жидкости. Результаты, полученные различными авторами, указывают на то, что при симметричном схлопывании пузырька создаются высокоинтенсивные поля давлений (до 5–10 тыс. атм.) и температур (до 15 000 °С).

На базе этой феноменологической модели разработан целый ряд конструкций реакторов, смесителей, миксеров и другого оборудования, использующего для обработки воды и других жидких сред эффекты суперкавитации (СК) — СК-аппараты [36]. Расчет и проектирование этих аппаратов постоянно совершенствуется с использованием результатов численных и физических экспериментов [36–44]. Полученные результаты позволяют рациональным образом определять конструктивные параметры СК-аппаратов при их проектировании.

Методика экспериментального исследования

Объектом экспериментального исследования выбраны образцы нержавеющей стали, полученные путем фрагментации трубы, находившейся в технологическом процессе радиохимического производства в течение 40 лет. Размер фрагментов составил $\varnothing 50 \times 3$, $L = 100$ мм [45]. Радионуклидное загрязнение образцов обусловлено ^{137}Cs .

Радионуклидный состав представленных образцов определяли с помощью спектрометра Inspector-1000 со сцинтилляционным детектором NaI(Tl). Для обработки спектров использовали программное обеспечение Genie-2000. Перед проведением дезактивации были измерены гамма-излучение от образца и поверхностное радиоактивное бета-загрязнение. Измерения проводились дозиметром-радиометром МКС-АТ1117М с блоками детектирования БДПБ-01, БДКГ-03. Условия измерения (параметры окружающей среды, внешний фон гамма-излучения) соответствовали техническим характеристикам средства измерения, приведенным в эксплуатационной документации, и составили $t = 24,7$ °С, $\psi = 61$ %, $P = 749$ мм рт. ст. Измерения параметров микроклимата проводили термогигрометром ИВТМ-7М. Внешний

фон гамма-излучения составил $N_\gamma = 0,27$ мкЗв/ч. Для измерения гамма-излучения от образцов был использован прямой метод измерения. Измерение мощности дозы от образцов проводили с автоматическим вычитанием фона.

Для оценки поверхностного радиоактивного бета-загрязнения использовали косвенный метод. Снимаемая поверхностная загрязненность определялась методом мазков. Для реализации данного метода были приготовлены листки фильтровальной бумаги размером 10×10 см. Из них 2–3% были проверены на чистоту. Процедура отбора проб методом сухого мазка состоит в протирании загрязненного участка, в данном случае образца, фильтровальной бумагой. Для этого бумагу прижимали к поверхности усилием 0,5–1 кг и проводили по контролируемому участку. Данную операцию повторяли три раза. Затем проводили измерение плотности потока бета-частиц от образцов фильтровальной бумаги.

Для измерения плотности потока бета-частиц был использован блок детектирования БДПБ-01, который размещался над точкой измерения так, чтобы поверхность чувствительного объема блока детектирования находилась на расстоянии 5–15 мм от исследуемой поверхности. Количество измерений в каждой точке — не менее пяти раз. Измерение плотности потока бета-частиц проводилось с вычитанием фона.

Методика, использованная в экспериментальном исследовании дезактивации образцов (все-го было дезактивировано 30 образцов), заключается в следующем:

- два образца дезактивированы обычной водой;
- 4 — щелочным раствором, в состав которого входит вода — 99,3%, NaOH — 0,5%, $KMnO_4$ — 0,2%;
- 4 — раствором волгонат — моющее средство, состоящее из воды — 99,3%, сульфанола — 0,5%, $H_2C_2O_4$ — 0,2%;
- 20 — водой, прошедшей кавитационную обработку.

Для получения кавитационно-активированной воды использовались суперкавитационные реакторы (СК-реакторы/миксеры) роторного типа [14]. Влияние гидродинамической кавитации на воду приводит к росту концентрации молекулярного кислорода, одним из механизмов образования которого являются химические процессы, инициируемые кавитацией и связанные с разложением молекулы H_2O на радикалы в кавитационной полости. Механолиз воды в этом случае включает в себя реакции, продуктами которых являются молекулярный кислород и водород, гидроксильные группы, перекись водорода [14]. Возбужденная молекула воды, наряду с излучением и диссипацией избыточной

энергии в тепло, может диссоциировать. Одновременно происходит и изменение структуры воды с образованием свободных водородных связей, что обуславливает ее повышенную активность и реакционную способность.

Обработка результатов

Для оценки эффективности дезактивации были рассчитаны коэффициент дезактивации, требуемый и приведенный коэффициент дезактивации. Для расчета коэффициента дезактивации использовали соотношение:

$$K_d = \frac{\Phi_n}{\Phi_k}, \quad (1)$$

где Φ_n — плотность потока частиц до дезактивации; Φ_k — плотность потока частиц после дезактивации.

Соотношение (1) не позволяет оценить, достигнута ли цель дезактивации, т. к. при одном и том же коэффициенте дезактивации остаточное количество загрязнений может быть выше уровней, обусловленных нормами радиационной безопасности. С целью учета этого обстоятельства вводим понятие о требуемом коэффициенте дезактивации $K_{тр}$, который для радиоактивного загрязнения поверхностей различных объектов можно представить в виде:

$$K_{тр} = \frac{\Phi_n}{\Phi_{дп}}, \quad (2)$$

где $\Phi_{дп}$ — допустимый уровень загрязнения.

Для того чтобы требуемый коэффициент дезактивации наиболее полно отражал эффективность и полноту обработки, введено понятие приведенного коэффициента дезактивации $ПК_d$ в виде:

$$ПК_d = \frac{\lg K_d}{\lg K_{тр}} = \frac{\lg \Phi_n - \lg \Phi_k}{\lg \Phi_n - \lg \Phi_{дп}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что $ПК_d$ учитывает достигнутую эффективность дезактивации (K_d) и требуемую ($K_{тр}$). Если при дезактивации достигнута цель и конечная загрязненность объекта равна допустимой, т. е. $\Phi_k = \Phi_{дп}$, то $ПК_d = 1$. Если же $\Phi_k > \Phi_{дп}$, т. е. дезактивация не произошла, $ПК_d = 0$. Следовательно, дезактивация эффективна тогда, когда $ПК_d \geq 1$. Это дает возможность сравнивать качество дезактивационных работ, проводимых различными способами и в разных условиях, по величине $ПК_d$. Для расчета $ПК_d$ использовали значение допустимого уровня радиоактивного загрязнения поверхности помещений постоянно пребывания персонала и находящегося в них оборудования равное 2000 част./см²·мин [46].

Экспериментальные результаты и их обсуждения

Реализованный эксперимент можно условно разделить на три серии. Первая серия заключалась в дезактивации образцов № 1 и № 2 обычной водой. Образцы были погружены в емкости с водой. Время контакта составило 20 мин. После этого образцы были извлечены из емкости и обтерты ветошью. Время воздействия составило около 2 мин. После этого были повторно измерены радиационные параметры и определены требуемый и приведенный коэффициенты дезактивации.

Вторая серия включала в себя дезактивацию образцов № 3–10 в емкостях с использованием химических реагентов, перечисленных выше. Образцы № 3–6 дезактивированы щелочным раствором следующего состава: вода — 99,3%, NaOH — 0,5%, $KMnO_4$ — 0,2%. Образцы № 7–10 дезактивировали раствором волгонат, в состав которого входит вода — 99,3%, сульфолон — 0,5%, $H_2C_2O_4$ — 0,2%. Алгоритм обработки образцов аналогичен описанному выше.

Третья серия посвящена дезактивации образцов № 11–30 водой, прошедшей кавитационную обработку. Первоочередной задачей эксперимента было определение оптимального времени погружения образцов в кавитационно-активированную воду. Для этого образцы № 11–20 были погружены в емкости с кавитационно-активированной водой. Через каждые 5 мин образцы извлекались, обтирались ветошью. Затем проводили измерения поверхностного радиоактивного загрязнения, рассчитывали коэффициент дезактивации. После этого, с учетом оптимального времени обработки образцов, было дезактивировано еще 10 образцов — № 21–30.

Результаты расчета коэффициента дезактивации, требуемого коэффициента дезактивации, приведенного коэффициента дезактивации для образцов № 1–10 представлены в табл. 1.

Видно, что для образцов № 3–10, погруженных в дезактивирующие растворы с химическими реагентами, значения плотности потока бета-частиц после дезактивации меньше допустимого значения, установленного в [46]. Дезактивация образцов № 1 и 2 неэффективна, т. к. значения плотности потока бета-частиц выше допустимых значений. Эффективность дезактивации начинает снижаться после 20 минут контакта образцов с кавитационно-активированной водой. Это объясняется переходом загрязнения из дезактивирующего раствора обратно на загрязненную поверхность. После определения оптимального времени обработки образцов

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов дезактивации для образцов № 1–10

Номер образца	Φ_n , част./см ² ·мин	Φ_k , част./см ² ·мин	K_d	$K_{тр}$	PK_d
Вода					
1	10600±2141	6200±1308	1,7±0,5	5,3	0,3
2	22300±4950	14800±3034	1,5±0,4	11,2	0,2
Щелочной раствор					
3	5600±1128	1030±216	5,4±1,6	2,8	1,6
4	35000±7280	1400±283	25±7,2	17,5	1,1
5	13000±2746	2000±445	6,5±2	6,5	1
6	27000±5751	906±201	29,8±9,1	13,5	1,3
Волгонат					
7	20000±4463	890±202	22,5±7,2	10	1,4
8	38000±7853	1600±405	23,8±7,8	19	1,1
9	14000±3416	1200±368	11,7±4,6	7	1,3
10	5200±1087	370±79	14,1±4,2	2,6	2,8

№ 11–20 кавитационно-активированной водой (рис. 1) было дезактивировано еще 10 образцов № 21–30. Для определения эффективности проведенной дезактивации были повторно измерены радиационные параметры исследуемых образцов. Результаты расчетов коэффициентов дезактивации для образцов № 11–30 представлены в табл. 2.

Видно, что величина коэффициента дезактивации образцов водой, прошедшей кавитационную обработку, находится в диапазоне от 2 до 15,8, что больше значения коэффициента дезактивации при использовании обычной воды (максимальное значение, найденное в литературе, — 2,5;

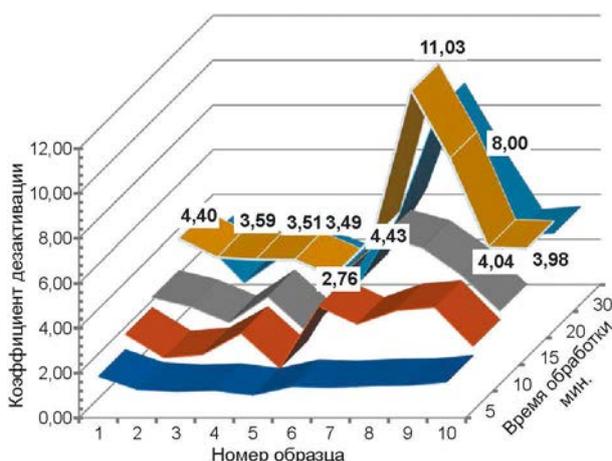


Рис. 1. Результаты определения оптимального времени обработки

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов дезактивации для образцов № 11 – 30

Номер образца	$\Phi_{н, \text{мин}}$ част./см ² ·мин	$\Phi_{к, \text{мин}}$ част./см ² ·мин	K_d	$K_{тр}$	$ПК_d$
Кавитационно-активированная вода					
11	4500±1198	1020±245	4,4±1,5	2,3	1,8
12	2600±590	722±143	3,6±1,1	1,3	4,8
13	6900±1938	1980±470	3,5±1,3	3,45	1
14	2900±661	830±170	3,49±1,1	1,5	3,0
15	5900±1222	2100±463	2,8±0,8	2,9	1
16	4900±1022	1120±282	4,4±1,5	2,5	1,6
17	69100±14190	6300±1380	11±2,9	34,6	0,7
18	17200±3486	2100±510	8,2±2,6	8,6	1
19	9100±1842	2200±555	4,1±1,2	4,6	0,9
20	10200±2056	2500±1039	4±0,6	5,1	0,7
21	7600±1563	2000±470	3,8±1,2	3,8	1
22	39000±8307	2600±556	15±4,5	19,5	0,9
23	8600±1734	4200±876	2,1±0,6	4,3	0,5
24	5100±1076	1300±364	3,9±1,4	2,5	1,5
25	38000±7852	2400±520	15,8±4,7	19	0,9
26	30100±6026	5300±1076	5,6±1,6	15,1	0,6
27	7900±1647	1250±373	6,3±2,3	3,9	1,4
28	4100±896	1400±342	2,9±0,9	2,1	1,4
29	5200±1080	1100±280	4,7±1,5	2,6	1,6
30	5000±1041	1200±442	4,2±1,8	2,5	1,6

полученное экспериментально, — 1,5–1,7), и сопоставимо с коэффициентами дезактивации при обработке поверхностей дезактивирующими растворами на основе химических реагентов.

Анализ приведенных коэффициентов дезактивации показывает следующее:

1. Дезактивация щелочным раствором и раствором волгонат для всех образцов эффективна — $ПК_d > 1$;

2. Дезактивация образцов водой неэффективна — $ПК_d < 1$;

3. Для 13 из 20 образцов, дезактивируемых кавитационно-активированной водой, дезактивация эффективна — $ПК_d > 1$ и значения $ПК_d$ находятся в диапазоне от 1 до 4,8. Для трех образцов значения $ПК_d$ составили 0,9.

На рис. 2 предложена модель автоматизированной системы дезактивации металлических радиоактивных отходов.

Подача кавитационно-активированной воды в емкость для обработки осуществляется из кавитационного смесителя. Контейнер с



Рис. 2. Схема системы дезактивации с использованием кавитационной технологии

дезактивируемым оборудованием крановой установкой помещается в первую емкость для замачивания. После погружной дезактивации в первой емкости контейнер перемещается в емкость для обработки водой под давлением. После обработки контейнер перемещается в печь сушки. Транспортировка осуществляется на кран-балке электрическим тельфером.

После дезактивации возможно повторное использование загрязненной кавитационно-активированной воды в других процессах, что позволит снизить объем вторичных ЖРО [2, 5, 18, 19, 47, 48].

Заключение

Анализируя результаты эксперимента, можно прийти к следующим выводам:

1. Установлена зависимость эффективности процесса дезактивации от времени обработки загрязненной поверхности дезактивирующим раствором на основе кавитационно-активированной воды. Оптимальное время обработки образцов составляет 20 минут.

2. Дезактивация образцов водой после кавитационной обработки более эффективна, чем дезактивация обычной водой, и сопоставима с результатами дезактивации щелочным раствором.

3. Повторное использование загрязненной кавитационно-активированной воды позволит снизить количество образующихся жидких радиоактивных отходов.

Литература

- Кулагина Т. А., Кулагин В. А., Матюшенко А. И. Техносферная безопасность в ядерной энергетике. Красноярск : Изд-во «Гротеск», СФУ, 2014. 286 с.
- Кулагина Т. А., Козин О. А., Попков В. А. Обращение с радиоактивными отходами. Красноярск : Изд-во «Гротеск», СФУ, 2018. 183 с.
- Gafarova V. V. Safe methods of radioactive waste utilization // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2016. №9(4). Pp. 585–597. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597.
- Kulagina T. A., Shelenkova V. V. Methods of decontamination of surfaces contaminations // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2017. № 10 (3). Pp. 352–363. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-352-363.

5. Кулагина Т. А., Кулагин В. А. Растворение алюмосиликатных осадков в хранилищах жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 2(11). С. 75—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-75-84.
6. Лисаченко Э. П., Матвеева И. Г., Стамой И. П. Формирование радионуклидного состава производственных отходов на объектах нефтегазового комплекса. Сб. науч. тр. СПб: ФГУН НИИРГ им. проф. П. В. Рамзаева, 2004. С. 45—46.
7. Клочков В. Н. Опасность радиоактивного загрязнения поверхностей как фактора внешнего и внутреннего облучения персонала // АНРИ. 2009. № 2 (57). С. 27—36.
8. Клочков В. Н., Рубцов В. И. Дезактивация средств индивидуальной защиты при ликвидации последствий радиационной аварии: опыт Чернобыля и его применение в современных условиях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. № 4. С. 19—23.
9. Tazart A., Berard P., Leiterer A., Me'ne'trier F. Decontamination of radionuclides from skin: an overview // Health Phys. 2013. Vol. 105 (2). Pp. 201—207.
10. Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» от 07.07.2011 № 899.
11. Дорофеев А. Н. О ходе работ по развитию нормативно-правовой базы в области обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 6—13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-6-13.
12. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года / Одобрено решением Президиума НТС ГК «Росатом» 26 декабря 2018 г. Москва, 2018. 62 с.
13. Большов Л. А., Линге И. И. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8). С. 14—27; DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-14-27.
14. Кулагин В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: Автореф. дисс... д-ра техн. наук. Красноярск : КГТУ, 2004. 47 с.
15. Ивченко В. М., Кулагин В. А., Немчин А. Ф. Кавитационная технология. / Под ред. акад. Г. В. Логвиновича. Красноярск : КГУ, 1990. 200 с.
16. Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И. Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем. / Под ред. чл.-кор. РАН А. М. Федотова. Новосибирск : Наука, 2012. 424 с.
17. Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И., Ли Ф.-Ч. Теплообмен и суперкавитация. Новосибирск : Наука, 2015. 436 с.
18. Кулагина Т. А., Кулагин В. А., Москвичев В. В., Попков В. А. Применение кавитационной технологии в процессах обращения с отработавшим ядерным топливом // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 10. С. 4—10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10.
19. Kulagin V., Kulagina T., Nikiforova E., Prikhodov D., Shimanskiy A., Li F.-Ch. Inclusion of liquid radioactive waste into a cement compound with an additive of multilayer carbon nanotubes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 227 (2019) 052030, 1—12; DOI: 10.1088/1755-1315/227/5/052030.
20. Зимон А. Д., Пикалов В. К. Дезактивация. М. : ИздАТ, 1994. 336 с.
21. Коряковский Ю. С., Акатов А. А., Доильницын В. А. Дезактивация: обеспечение радиационной безопасности на предприятиях ядерной отрасли. СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2010. 150 с.
22. Омельянюк М. В. Дезактивация нефтепромышленного оборудования от природных радионуклидов // Экология и промышленность России. 2013. № 2. С. 4—9.
23. Акатов А. А., Коряковский Ю. С., Доильницын В. А. и др. Глубокая дезактивация металлов с применением ультразвука и электрохимических реакций // Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности: Сб. тр. НПК, 2016. С. 57—60.
24. Ojovan M. I., Lee W. E., Kalmykov S. N. An introduction to nuclear waste immobilisation. 2019. 512 p.
25. Boing L. E. Decommissioning of nuclear facilities. Decontamination technologies // International Atomic Energy Agency, Manila, Philippines, October 2016.
26. Kumar V., Goel R., Chawla R., Silambarasan M., Sharma R. K. Chemical, biological, radiological, and nuclear decontamination: Recent trends and future perspective // Journal of pharmacy & BioAllied sciences. 2010. № 2 (3). Pp. 220—238.
27. Ruhman N., Vesper G., Martin C. The effectiveness of decontamination products in the nuclear medicine department // Journal of nuclear medicine technology. 2010. Vol. 38. Pp. 191—194.
28. Van Den Avyle J. A., Melgaard D., Molecke M., Pal U., Bychkov S. I. Optimization of Thermochemical, Kinetic, and Electrochemical Factors Governing Partitioning of Radionuclides during Melt Decontamination of Radioactively Contaminated Stainless Steel. NTIS Reports. 2004.
29. Leonardi N. M., Tesán F. C., Zubillaga M. B., Salgueiro M. J. Radioactivity Decontamination of Materials Commonly Used as Surfaces in General-Purpose Radioisotope Laboratories // Journal of Nuclear Medicine Technology. 2014. Vol. 42 (4). Pp. 292—295.
30. Савкин А. Е., Карлина О. К., Васильев А. П. и др. Испытания ультразвуковой установки для дезактивации металлических радиоактивных отходов // Безопасность окружающей среды. 2007. № 3. С. 38—41.
31. Кутьков В. А., Ткаченко В. В., Романцов В. П. и др. Основы радиационного контроля на АЭС. / Под ред. В. А. Кутькова, В. В. Ткаченко. Москва-Обнинск : Концерн «Росэнергоатом», ИАТЭ, 2005. 268 с.

32. McCleskey T. M., Birnbaum E. R. Micelle Formation and Surface Interactions in Supercritical CO₂. Fundamental Studies for the Extraction of Actinides from Contaminated Surfaces. NTIS Reports. 2005.
33. Rai D., Rao L., Moore R. C., Bontchev R., Holt K. Development of Biodegradable Isosaccharinate-Containing Foams for Decontamination of Actinides: Thermodynamic and Kinetic Reactions between Isosaccharinate and Actinides on Metal and Concrete Surfaces. NTIS Reports. 2005.
34. Yang H.-M., Park C. W., Lee K.-W. Enhanced surface decontamination of radioactive Cs by self-generated, strippable hydrogels based on reversible cross-linking // Journal of Hazardous Materials. January 2019. Vol. 362. Pp. 72–81.
35. Haslip D. S., Cousins T., Hoffarth B. E. Efficacy of Radiological Decontamination. NTIS Reports. 2001.
36. Кулагин В. А., Вильченко А. П., Кулагина Т. А. Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2001. 187 с.
37. Витер В. К., Кулагин В. А. Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. 243 с.
38. Кулагин В. А., Москвичев В. В., Махутов Н. А., Маркович Д. М., Шокин Ю. И. Проблемы физического и математического моделирования в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. № 11. С. 978–990. DOI: 10.7868/S0869587316110062.
39. Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W. H., Kulagin V. A., Li H., Li F.-Ch. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination // Desalination. 2019. Vol. 455. Pp. 1–18. DOI.org/10.1016/j.desal.2018.12.012.
40. Zheng Z.-Y., Li Q., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedged shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator // Sci. China Tech. Sci. 2015. Vol. 58. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s11431-015-5827-y.
41. Likhachev D. S., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination // Sci. China Tech. Sci. 2014. Vol. 57. Pp. 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.
42. Kulagin V. A., Pyanykh T. A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50. № 1–2. Pp. 24–29. DOI: 10.1007/s10556-014-9848-3.
43. Кулагин В. А., Пьяных Т. А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 1. С. 57–62.
44. Kulagin V. A., Kulagina T. A., Shelenkova V. V. Phenomenological model of hydrodynamic cavitation influence on water systems // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2019. № 12 (7). Pp. 818–829. DOI: 10.17516/1999-494X-0182.
45. Shelenkova V. V., Kormich A. I., Kozin O. A., Kulagina T. A. Decontamination of the equipment from radioactive contamination of water after cavitation treatment // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2018. № 11 (6). Pp. 732–743. DOI: 10.17516/1999-494X-0088.
46. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
47. Попков В. А. Развитие технологий обращения с отработавшим ядерным топливом. Дисс... канд. техн. наук. Красноярск : ФГАОУ ВО СФУ, 2016. 143 с.
48. Козин О. А. Методы и средства повышения экологической безопасности обращения с отходами ядерно-энергетического цикла: Дисс... канд. техн. наук. Красноярск : ФГАОУ ВО СФУ, 2011. 114 с.

Информация об авторах

Шеленкова Вероника Вячеславовна, инженер по дозиметрическому контролю отдела радиационной безопасности, ФГУП «Горно-химический комбинат» (662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 56), e-mail: v.v.gafarova@gmail.com.

Кулагина Татьяна Анатольевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой техносферной и экологической безопасности, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79), e-mail: tak.sfu@gmail.com.

Библиографическое описание статьи

Шеленкова В. В., Кулагина Т. А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38.

REFINEMENT OF A DECONTAMINATION TECHNOLOGY FOR RADIOACTIVELY CONTAMINATED EQUIPMENT

Shelenkova V. V.¹, Kulagina T. A.²

¹Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine”, Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, Russia

²Federal State Autonomous Educational University of Higher Education “Siberian Federal University”, Krasnoyarsk, Russia

Article received on January 28, 2021

This article analyzes the data on chemical decontamination methods dealing with radioactively contaminated surfaces. It considers the composition of solutions most commonly used for decontamination purposes. Numerical data are presented to illustrate the effectiveness of various decontamination methods. The paper considers an experiment on the decontamination of stainless steel samples with water following a cavitation treatment. The study reveals a dependence between the decontamination efficiency and the treatment time of the contaminated surface with a decontamination solution based on cavitation-activated water, which appears to be comparable with the results of the one involving an alkaline solution.

Keywords: radioactive waste, decontamination, surface contamination, decontamination solution, cavitation treatment, decontamination factor.

References

1. Kulagina T. A., Kulagin V. A., Matyushenko A. I. *Tekhnosfernaya bezopasnost' v yadernoy energetike* [Technosphere Safety in Nuclear Energy]. Krasnoyarsk, Grotisque Publ., SFU, 2014. 286 p.
2. Kulagina T. A., Kozin O. A., Popkov V. A. *Obrashcheniye s radioaktivnymi otkhodami* [Radioactive waste management]. Krasnoyarsk, Grotisque Publ., SFU, 2018. 183 p.
3. Gafarova V.V. Safe methods of radioactive waste utilization. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, no. 9 (4), pp. 585–597. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597.
4. Kulagina T. A., Shelenkova V. V. Methods of decontamination of surfaces contaminations *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2017, no. 10 (3), pp. 352–363. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-352-363.
5. Kulagina T. A., Kulagin V. A. Rastvorenie alyumosilikatnykh osadkov v khranilishchakh zhidkikh RAO [Aluminosilicate Sediment Dissolution in Liquid Radioactive Waste Storage Facilities]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 2 (11), pp. 75–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-75-84.
6. Lisachenko E. P., Matveeva I. G., Stamoj I. P. *Formirovanie radionuklidnogo sostava proizvodstvennih othodov na ob'ektah neftegazovogo kompleksa* [Formation of the radionuclide composition of industrial waste at the facilities of the oil and gas complex]. Collection of scientific papers. Saint-Petersburg, FGUN NIIRG named after Prof. P. V. Ramzaeva Publ., 2004, pp. 45–46.
7. Klochkov V. N. Opasnost' radioaktivnogo zagryazneniya poverhnostey kak faktora vneshnego i vnutrennego oblucheniya personala [The danger of radioactive contamination of surfaces as a factor of external and internal exposure of personnel]. *ANRI — ANRI*, 2009, no. 2 (57), pp. 27–36.
8. Klochkov V. N., Rubtsov V. I. Dezaktivatsiya sredstv individual'noy zashity pri likviatsiy posledstviy radiacionnoy avari: opyt Chernobilay i ego primeneniye v sovremennih usloviyah [Decontamination of personal protective equipment during elimination of the consequences of a radiation accident: the experience of Chernobyl and its application in modern conditions]. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' — Medical radiology and radiation safety*, 2016, no. 4, pp. 19–23.
9. Tazrart A., Berard P., Leiterer A., Me'ne'trier F. Decontamination of radionuclides from skin: an overview. *Health Phys.*, 2013, vol. 105 (2), pp. 201–207.
10. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii «Ob utverzhdanii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologii Rossiyskoy Federatsii» ot 7 iyulya 2011 goda N 899 [Decree of the President of the Russian Federation “On approval of priority areas for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation” dated July 7, 2011 No. 899].
11. Dorofeyev A. N. O khode rabot po razvitiyu normativno-pravovoi bazy v oblasti obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami [On the progress of development of the regulatory framework in the field of radioactive waste management]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 6–13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-6-13.
12. *Strategiya razvitiya yadernoy energetiki Rossii do 2050 goda i perspektivy na period do 2100 goda* [Strategy

- for nuclear power development in Russia until 2100]. Approved by the order of Scientific Technical Council's Presidium of the State Corporation Rosatom on the 26th of December, 2018. Moscow, 62 p.
13. Bolshov L. A., Linge I. I. O soglasovanii etapov razvitiya atomnogo energopromyshlennogo kompleksa i sistemy obrashcheniya s RAO [On the coordination of the stages of development of the atomic energy industrial complex and the radioactive waste management system]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2019, no. 3 (8), pp. 14–27. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-14-27.
14. Kulagin V. A. *Metody i sredstva tekhnologicheskoy obrabotki mnogokomponentnykh sred s ispol'zovaniyem effektivov kavitatsii* [Methods and means of technological processing of multicomponent media using cavitation effects]. Diss. ... Dr. tech. sciences. Krasnoyarsk, 2004. 406 p.
15. Ivchenko V. M., Kulagin V. A., Nemchin A. F. *Kavitatsionnaya tekhnologiya* [Cavitation technology]. Ed. by acad. G. V. Logvinovich. Krasnoyarsk, KSU Publ., 1990. 200 p.
16. Demidenko N. D., Kulagin V. A., Shokin Yu. I. *Modelirovaniye i vychislitel'nyye tekhnologii raspredelennykh sistem* [Modeling and computing technology of distributed systems]. Ed. by Corr. Member RAS A. M. Fedotov. Novosibirsk, Nauka Publ., 2012. 424 p.
17. Demidenko N. D., Kulagin V. A., Shokin Yu. I., Li F.-Ch. *Teplomassoobmen i superkavitatsiya* [Heat and mass transfer and supercavitation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015. 436 p.
18. Kulagina T. A., Kulagin V. A., Moskvichev V. V., Popkov V. A. *Primeneniye kavitatsionnoy tekhnologii v protsessakh obrashcheniya s otrabotavshim yadernym toplivom* [The use of cavitation technology in the processes of handling spent nuclear fuel]. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 10, pp. 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10.
19. Kulagin V., Kulagina T., Nikiforova E., Prikhodov D., Shimanskiy A., Li F.-Ch. Inclusion of liquid radioactive waste into a cement compound with an additive of multilayer carbon nanotubes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 227 (2019) 052030, 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/227/5/052030.
20. Zimon A. D., Pikalov V. K. *Dezaktivatsiy* [Deactivation]. Moscow, Izdat Publ., 1994. 336 p.
21. Koryakovskiy U. S., Akatov A. A., Doil'nicin V. A. *Dezaktivatsiy: obespechenie radiatsionnoi bezopasnosti na predpriyatiyah yadernoy otrasli* [Decontamination: ensuring radiation safety at nuclear facilities]. Saint-Petersburg, SPbGTI (TU) Publ., 2010. 150 p.
22. Omel'yanuk M. V. *Dezaktivatsiy neftepromislovogo oborudovaniya ot prirodnykh radionuklidov* [Decontamination of oilfield equipment from natural radionuclides]. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
23. Akatov A. A., Koryakovskiy U. S., Doil'nicin V. A. et al. Glubokaya dezaktivatsiy metalov s primeneniem ul'trazvuka i elektrohimicheskikh reaktsiy [Deep decontamination of metals with ultrasound and electrochemical reactions]. *Topical issues of nuclear and chemical technology and environmental safety: Proceedings of the scientific and practical conference*, 2016, pp. 57–60.
24. Ojovan M. I., Lee W. E., Kalmykov S. N. *An introduction to nuclear waste immobilisation*. 2019. 512 p.
25. Boing L. E. *Decommissioning of nuclear facilities. Decontamination technologies*. International Atomic Energy Agency, Manila, Philippines, October 2016.
26. Kumar V., Goel R., Chawla R., Silambarasan M., Sharma R. K. Chemical, biological, radiological, and nuclear decontamination: Recent trends and future perspective. *Journal of pharmacy & BioAllied sciences*, 2010, no. 2 (3), pp. 220–238.
27. Ruhman N., Vesper G., Martin C. The effectiveness of decontamination products in the nuclear medicine department. *Journal of nuclear medicine technology*, 2010, vol. 38, pp. 191–194.
28. Van Den Avyle J. A., Melgaard D., Molecke M., Pal U., Bychkov S. I. *Optimization of Thermochemical, Kinetic, and Electrochemical Factors Governing Partitioning of Radionuclides during Melt Decontamination of Radioactively Contaminated Stainless Steel*. NTIS Reports. 2004.
29. Leonardi N. M., Tesán F. C., Zubillaga M. B., Salgueiro M. J. Radioactivity Decontamination of Materials Commonly Used as Surfaces in General-Purpose Radioisotope Laboratories. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 2014, vol. 42 (4), pp. 292–295.
30. Savkin A. Ye., Karlina O. K., Vasiliev A. P. et al. Ispitaniya ultrazvukovoy ustanovki dlya dezaktivatsiy metalicheskikh radiativnykh othodov [Ultrasonic testing installation for decontaminating radioactive metallic waste]. *Bezopasnost' okruzhayushchei sredy — Environmental safety*, 2007, no. 3, pp. 38–41.
31. Kut'kov V. A., Tkachenko V. V., Romantsov V. P. et al. *Osnovi radiatsionnogo kontrolya na AES* [Fundamentals of radiation monitoring at nuclear power plants]. Ed. by V. A. Kut'kov and V. V. Tkachenko. Moscow-Obninsk, Rosenergoatom Publ., 2005. 268 p.
32. McCleskey T. M., Birnbaum E. R. *Micelle Formation and Surface Interactions in Supercritical CO₂. Fundamental Studies for the Extraction of Actinides from Contaminated Surfaces*. NTIS Reports. 2005.
33. Rai D., Rao L., Moore R.C., Bontchev R., Holt K. *Development of Biodegradable Isosaccharinate-Containing Foams for Decontamination of Actinides: Thermodynamic and Kinetic Reactions between Isosaccharinate and Actinides on Metal and Concrete Surfaces*. NTIS Reports. 2005.

34. Yang H.-M., Park C. W., Lee K.-W. Enhanced surface decontamination of radioactive Cs by self-generated, strippable hydrogels based on reversible cross-linking. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 362, pp. 72–81.
35. Haslip D. S., Cousins T., Hoffarth B. E. *Efficiency of Radiological Decontamination*. NTIS Reports. 2001.
36. Kulagin V. A., Vil'chenko A. P., Kulagina T. A. *Modelirovaniye dvukhfaznykh superkavitatsionnykh potokov* [Modeling of two-phase supercavitation flows]. Ed. by V. I. Bykov. Krasnoyarsk, IPC KSTU Publ., 2001. 187 p.
37. Viter V. K., Kulagin V. A. *Krupnomashtabnye gravitazionnye gidrodinamicheskie trubi* [Large-scale hydrodynamic gravity tubes] Krasnoyarsk, IPC KSTU Publ., 2006. 243 p.
38. Kulagin V. A., Moskvichev V. V., Makhutov N. A., Markovich D. M., Shokin Yu. I. Physical and mathematical modeling in the field of high-velocity hydrodynamics in the experimental base of the Krasnoyarsk hydroelectric plant. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk — Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, no. 6, pp. 454–465; DOI: 10.1134/S1019331616060034.
39. Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W.-H., Kulagin V. A., Li H., Li F.-Ch. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination. *Desalination*, 2019, vol. 455, pp. 1–18. DOI.org/10.1016/j.desal.2018.12.012.
40. Zheng Z. Y., Li Q., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedged shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator. *Sci. China Tech. Sci*, 2015, vol. 58, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s11431-015-5827-y.
41. Likhachev D. S., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination. *Sci. China Tech. Sci.*, 2014, vol. 57, pp. 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.
42. Kulagin V. A., P'yanykh T. A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 50, no. 1–2, pp. 24–29. DOI: 10.1007/s10556-014-9848-3.
43. Kulagin V. A., P'yanykh T. A. Issledovanie kavitatsionnih techeniy sredstvami matematicheskogo modelirovaniya [Study of cavitation flows by means of mathematical modeling]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii — Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 57–62.
44. Kulagin V. A., Kulagina T. A., Shelenkova V. V. Phenomenological model of hydrodynamic cavitation influence on water systems. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, no. 12 (7). pp. 818–829. DOI: 10.17516/1999-494X-0182.
45. Shelenkova V. V., Kormich A. I., Kozin O. A., Kulagina T. A. Decontamination of the equipment from radioactive contamination of water after cavitation treatment. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2018, no. 11 (6), pp. 732–743. DOI: 10.17516/1999-494X-0088.
46. *Normi radiacionnoy bezopasnosti* [Standards of radiation safety] (NPB-99/2009): Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p.
47. Popkov V. A. *Razvitie tekhnologiy obrasheniya s otrabotavshim yadernim toplivom* [Development of technologies for handling spent nuclear fuel]. Cand. tech. sci. diss. Krasnoyarsk, FGAOU VO SibFU Publ., 2016. 143 p.
48. Kozin O. A. *Metody i sredstva povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti obrashcheniya s otkhodami yaderno-energeticheskogo tsikla* [Methods and means of improving the environmental safety of waste management of the nuclear energy cycle]. Cand. tech. sci. diss. Krasnoyarsk, FGAOU VO SibFU Publ., 2011. 123 p.

Information about the authors

Shelenkova Veronika Vyacheslavovna, Dosimetric Control Engineer, Radiation Safety Department, Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine” (56, Lenina st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia), e-mail: v.v.gafarova@gmail.com.

Kulagina Tatyana Anatolyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technosphere and Environmental Safety, Federal State Autonomous Educational University of Higher Education “Siberian Federal University” (79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia), e-mail: tak.sfu@gmail.com.

Bibliographic description

Shelenkova V. V., Kulagina T. A. Refinement of a decontamination technology for radioactively contaminated equipment. *Radioactive Waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38. (In Russian).