

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
(институт)

Кафедра «Управление промышленной и экологической безопасностью»
20.04.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы управления производственной, промышленной и экологической безопасностью

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Усовершенствование технологии очистки жидких радиоактивных
отходов при захоронении в опытно-промышленный
полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград

Студент(ка)	<u>В.Н. Семенов</u>	<u>(личная подпись)</u>
Научный руководитель	<u>Н.Г. Шерышева</u>	<u>(личная подпись)</u>
Нормоконтроль	<u>В.В. Петрова</u>	<u>(личная подпись)</u>

Руководитель программы д.п.н., профессор Л.Н.Горина _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« » _____ 20 г.

Допустить к защите
Заведующий кафедрой д.п.н., профессор Л.Н.Горина _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« » _____ 20 г.

Тольятти 2017

РЕФЕРАТ

Диссертация 90 с., 3 ч., 15 рис., 14 табл., 42 источника.

ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ, ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, ОЧИСТКА, ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ГЛУБИННОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА.

Объектом исследования являются жидкие радиоактивные отходы, поступающие на захоронение. Предмет исследования – методы очистки жидких радиоактивных отходов при захоронении в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград.

Цель исследования заключается в улучшении обработки жидких радиоактивных отходов, поступающих в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград.

Исходя из цели исследования, был сформулирован следующий ряд задач:

- теоретический анализ обработки жидких радиоактивных отходов, методов очистки ЖРО и современных тенденций в области очистки и захоронения ЖРО;
- анализ методов экологической и экономической эффективности методов очистки ЖРО;
- анализ современных патентов в области очистки ЖРО;
- выбор наиболее приемлемого способа очистки жидких радиоактивных отходов при захоронении в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград;
- определение оптимальных режимов работы внедряемого оборудования.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования отдельных составляющих технологической схемы захоронения.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая степень очистки от механических примесей и от радионуклидов цезия.

Эффективность усовершенствованного метода очистки определяется малым количеством вторичных отходов и невысокой стоимостью затрат. Предлагаемый метод может применяться на предприятиях атомной отрасли при обращении с жидкими радиоактивными отходами.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1 Состояние проблемы очистки и захоронения ЖРО	11
1.1 Классы РАО и методы решения проблемы их захоронения	11
1.2 Методы очистки ЖРО.....	22
1.3 Современные тенденции в области очистки и захоронения ЖРО.....	27
ГЛАВА 2 Эколого-экономический эффект захоронения ЖРО	33
2.1 Оптимизация экологического эффекта захоронения ЖРО	33
2.2 Оптимизация экономического эффекта захоронения ЖРО	48
ГЛАВА 3 Предложение совершенствованной технологии очистки	61
3.1 Совершенствование очистки от механических примесей.....	61
3.1.1 Исследование работы фильтра насыпного при очистке ЖРО	69
3.2 Совершенствование очистки от радионуклидов цезия-137	72
3.3 Определение оптимального режима работы фильтров.....	74
3.3.1 Анализ изменения параметров во время процесса захоронения.....	74
3.3.2 Режимы работы фильтров.....	78
3.4 Определение экологического и экономического эффекта.....	80
3.4.1 Расчёт экономического эффекта	80
3.4.2 Определение экологического эффекта.....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	85

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов: Захоронение жидких радиоактивных отходов в глубокозалегающих пластах-коллекторах на глубине нескольких сотен метров в пределах границ горного отвода путем нагнетания через нагнетательные скважины;

- захоронение радиоактивных отходов: Безопасное размещение радиоактивных отходов в пункте захоронения радиоактивных отходов без намерения их последующего извлечения;

- кольматация: Процесс естественного проникновения или искусственного внесения мелких (главным образом коллоидных, глинистых и пылеватых) частиц и микроорганизмов в поры и трещины горных пород, а также осаждение в них химических веществ, способствующее уменьшению их водо- или газопроницаемости;

- кондиционирование радиоактивных отходов: Технологические операции по приведению радиоактивных отходов в физическую форму и состояние, пригодные для их захоронения и соответствующие критериям приемлемости;

- обращение с радиоактивными отходами: Деятельность по сбору, сортировке, переработке, кондиционированию, перевозке, хранению и захоронению радиоактивных отходов;

- пласт-коллектор: Водоносный горизонт земной коры, изолированный от выше и ниже лежащих горизонтов водоупорами, в который нагнетаются радиоактивные отходы;

- пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов: Пункт захоронения радиоактивных отходов, включающий в себя сооружение, размещенное на глубине более ста метров от поверхности земли;

- приёмистость скважины: Характеристика нагнетательной скважины, показывающая возможность закачки рабочего агента (воды, газа, пара и др.) в пласт;

- радиоактивные отходы: Не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АО «ГНЦ НИИАР»	Акционерное общество «Государственный научный центр – научно-исследовательский институт атомных реакторов»
ЖРО	жидкие радиоактивные отходы
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
ОПП	опытно-промышленный полигон
ПГЗ ЖРО	пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов
РАО	радиоактивные отходы
ФГУП «НО РАО»	Федеральное государственное унитарное предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»
ЯЭУ	ядерная энергетическая установка

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы работы. Сегодня атомная промышленность занимает заметное место в мировом производстве электроэнергии. Дальнейший прогресс в данной области в немалой степени зависит от обеспечения безопасности ее использования. В частности, одной из ключевых проблем является обращение с радиоактивными отходами.

Жидкие радиоактивные отходы, которые образуются при эксплуатации объектов использования атомной энергии, в медицинских организациях и в других организациях, применяющих радиоактивные вещества, являются одним из источников загрязнения радионуклидами окружающей среды. Проблема очистки, обработки ЖРО в настоящее время во многих странах стоит очень остро. Собственно переработка ЖРО направлена на решение двух основных задач:

- очистка радиоактивных отходов от радионуклидов;
- приведение их в форму, удобную для дальнейшего захоронения.

Выбор основного метода переработки ЖРО определяется в зависимости от радионуклидного состава отходов, уровня их активности, химического состава, а также их объема.

Разные страны решают проблему очистки и захоронения ЖРО по-разному. Раньше жидкие радиоактивные отходы захоранивали в пресных и морских водоемах и в подземных горизонтах. Позднее в ряде западных стран, в том числе в США, Канаде и в странах Европы, была принята концепция многобарьерного варианта захоронения радиоактивных отходов. Но актуальность изучаемой нами проблемы заключается в том, что ни один из существующих на данный момент методов очистки ЖРО не является в полной мере как эффективным, так и экономически выгодным. Учитывая, что сегодня сложно говорить о принципиально новых методах обработки ЖРО, необходимо изучать возможные варианты модернизации уже существующих методов,

активно применяющихся на практике, с учетом экономических затрат и их влияния на экологию.

Цель исследования заключается в улучшении обработки жидких радиоактивных отходов, поступающих в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград.

Задачи исследований. Исходя из цели исследования, был сформулирован следующий ряд задач:

- теоретический анализ обработки жидких радиоактивных отходов, методов очистки ЖРО и современных тенденций в области очистки и захоронения ЖРО;

- анализ методов экологической и экономической эффективности методов очистки ЖРО;

- выбор наиболее приемлемого способа очистки жидких радиоактивных отходов при захоронении в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград;

- определение оптимальных режимов работы внедряемого оборудования.

Объектом исследования являются жидкие радиоактивные отходы, поступающие на захоронение.

Предмет исследования – методы очистки жидких радиоактивных отходов при захоронении в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград.

Степень разработанности проблемы можно оценить как достаточно высокую. Разработано значительное количество способов комплексной переработки ЖРО, а также способов очистки от отдельных радионуклидов.

Тем не менее, не смотря на существенную проработку тематики, необходимо отметить, что выбор необходимой методики очистки ЖРО является трудоемкой задачей, а также требует глубокого изучения объекта внедрения. Многие предлагаемые способы очистки не рассчитаны на большой объем ЖРО, и сопровождаются появлением значительного объема вторичных отходов, что заметно увеличивает экономические затраты.

Научная новизна. Научная новизна заключается в разработке схемы очистки ЖРО с различными режимами работы ступеней очистки перед глубинным захоронением.

Практическая значимость работы заключается в улучшении обработки жидких радиоактивных отходов, поступающих на захоронение в опытно-промышленный полигон ФГУП «НО РАО» г. Димитровград с помощью спецификации условий данного предприятия, а также анализа и выбора способа, наиболее подходящего для внедрения, с учетом экономической и экологической составляющих.

Научные положения, выносимые на защиту:

- обоснование выбора способа для решения выявленных проблем;
- обоснование технологической схемы очистки ЖРО, поступающих на захоронение.

Публикации. Материалы по теме диссертации представлены в двух опубликованных статьях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка источников, состоящего из 42 наименований. Работа выполнена на 90 страницах, содержит 15 рисунков и 14 таблиц.

ГЛАВА 1 Состояние проблемы очистки и захоронения ЖРО

1.1 Классы РАО и методы решения проблемы их захоронения

Сегодня в России действует классификация радиоактивных отходов, принятая в Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010), утвержденных Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 [1]. В соответствии с этим документом, к радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию вещества, материалы, смеси, изделия, удельная активность техногенных радионуклидов в которых превышает МЗУА (минимально значимая удельная активность). Если радионуклидный состав неизвестен, то отходы являются радиоактивными при превышении суммарной удельной активности техногенных радионуклидов следующих показателей:

- 100 кБк/кг - для бета-излучающих радионуклидов;
- 10 кБк/кг - для альфа-излучающих радионуклидов (за исключением трансурановых);
- 1,0 кБк/кг - для трансурановых радионуклидов.

Радиоактивные отходы (РАО) могут образовываться в различных формах и потому обладать разными физико-химическими характеристиками, к которым относятся, в частности, периоды полураспада и концентрации составляющих их радионуклидов.

Радиоактивные отходы подразделяются на две основные группы:

- удаляемые радиоактивные отходы, то есть, риски, связанные с их радиационным воздействием, иные риски и расходы на их извлечение и работу с ними (включая захоронение), не превышают риски и затраты, связанные с их захоронением в месте их нахождения;
- особые радиоактивные отходы, то есть риски, связанные с их радиационным воздействием, иные риски и расходы на их извлечение и работу

с ними (включая захоронение), превышают риски и затраты, связанные с их захоронением в месте их нахождения [2].

Радиоактивные отходы существуют в газообразной, жидкой и твердой форме. Жидкие радиоактивные отходы - это промышленные отходы, которые содержат радиоактивные нуклиды техногенного происхождения. Это значит, что ЖРО образуются в результате деятельности предприятий ядерного топливного цикла, предприятий оборонного и иного вида атомной промышленности, атомных электростанций, при производстве и использовании радиоизотопной продукции, при эксплуатации судов атомного флота, а также при радиационных авариях [3]. Эксперты отмечают, что при прочих равных условиях (радионуклидный состав, масса, удельная активность и др.) жидкости с радионуклидами намного более опасны для человека, чем твердые материалы. Так как ЖРО обладают значительной способностью распространяться в окружающей среде и включаться в пищевые цепочки [4].

Распад радиоактивных элементов происходит самопроизвольно, причем изменить интенсивность их излучения невозможно, также как и полностью лишить вещество его радиоактивных свойств путем внешних физических воздействий. Таким образом, все методы обезвреживания сточных вод, в которых присутствуют долгоживущие изотопы, направлены не на их окончательное уничтожение, а на захоронение после предварительной обработки.

Международная система классификации отходов разработана МАГАТЭ [5]. Она определяет следующие классы РАО в зависимости от активности и периода полураспада радионуклидов:

- освобожденные (изъятые) отходы (EW);
- очень короткоживущие отходы (VSLW);
- очень низкоактивные отходы (VLLW);
- низкоактивные отходы (LLW);
- отходы среднего уровня активности (ILW);
- высокоактивные отходы (HLW).

В России по удельной активности радиоактивные отходы подразделяются на 3 категории: низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (таблица 1) [1].

Таблица 1 - Классификация радиоактивных отходов

Удельная активность, кБк/кг				
Категория отходов	Тритий	Бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий)	Альфа-излучающие нуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	от 10^6 до 10^7	менее 10^3	менее 10^2	менее 10^1
Среднеактивные	от 10^7 до 10^{11}	от 10^3 до 10^7	от 10^2 до 10^6	от 10^1 до 10^5
Высокоактивные	более 10^{11}	более 10^7	более 10^6	более 10^5

В отдельную группу выделяют короткоживущие отходы. У них время распада радионуклидов до безопасного уровня составляет менее одного года. Поэтому такие отходы не требуют очистки и захоронения и могут находиться на временном хранении с последующим обращением с ними как с нерадиоактивными отходами.

В 1992 году, согласно принятым международным обязательствам, Россия прекратила слив в открытые водоемы низкоактивных ЖРО, которые образовывались при эксплуатации транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [6]. Но в конце 2003-в начале 2004 гг. главы нескольких российских ведомств - Госатомнадзора, Госсанэпиднадзора, Минатома и Минприроды - подписали «Решение о статусе и порядке эксплуатации специальных промышленных водоемов, используемых ФГУП «ПО «Маяк», так называемое «решение четырех». В 2010 г. в ОСПОРБ-99/2010 были внесены изменения, согласно которым запрещался сброс ЖРО в поверхностные и подземные воды, а также требовалось отверждение ЖРО. Сейчас запрещен сброс жидких отходов, удельная активность которых выше показателей, указанных в приложении 3 правил. При превышении этой активности требуется проводить отверждение отходов [4].

Жизненный цикл радиоактивных отходов представлен на рисунке 1 [7].

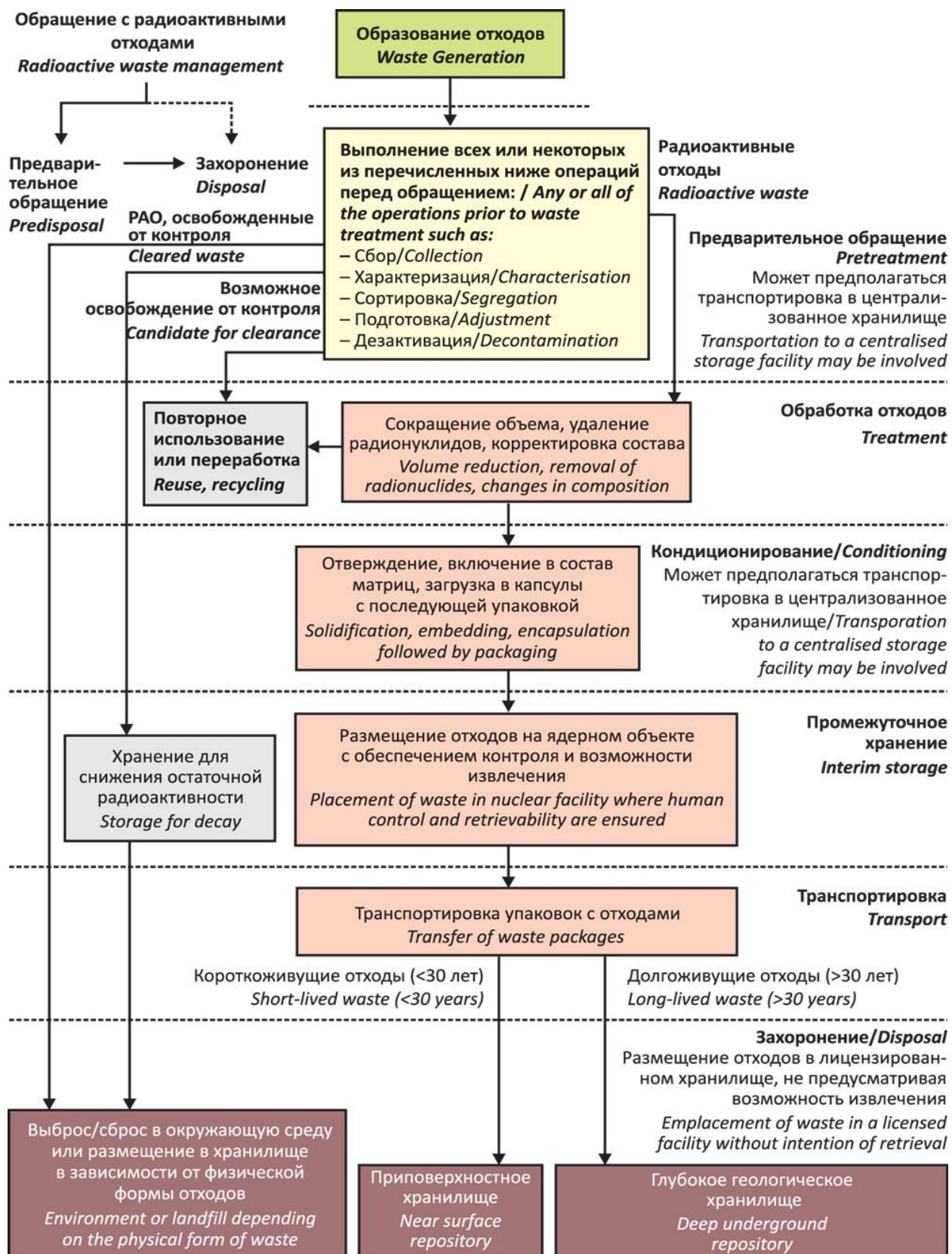


Рисунок 1 - Жизненный цикл радиоактивных отходов

Таким образом, обращение с радиоактивными отходами делится на два основных этапа:

- предшествующий захоронению: от образования до захоронения, включая обработку (предварительная обработка, переработка и кондиционирование), временное хранение и транспортировка;
- собственно захоронение - постоянное размещение отходов в соответствующем сооружении без намерения их изъятия [7].

Сегодня на начальном этапе переработки жидких радиоактивных отходов проводится процедура выпаривания (концентрирования) раствора, содержащего ЖРО. Это необходимо для уменьшения объема ЖРО в 20-100 раз. При использовании специальных установок глубокого упаривания можно довести концентрацию солей в растворе (всех, а не только радиоактивных) до 400-1200 г/л (т.н. «солевой плав») [8].

Концепция окончательного захоронения радиоактивных отходов базируется на двух основных принципах:

- связывание радионуклидов в матрицах и окружение их стабильными барьерами для удержания (транспортная тара и контейнеры) (рисунок 2);
- контроль за возможными утечками остаточной радиоактивности в окружающую среду [9].

Для реализации второго принципа проводится тщательный выбор геологической вмещающей среды и разрабатываются специально спроектированные установки для захоронения, которые позволяют свести к минимуму уровень радиоактивности, достигающий биосферы.

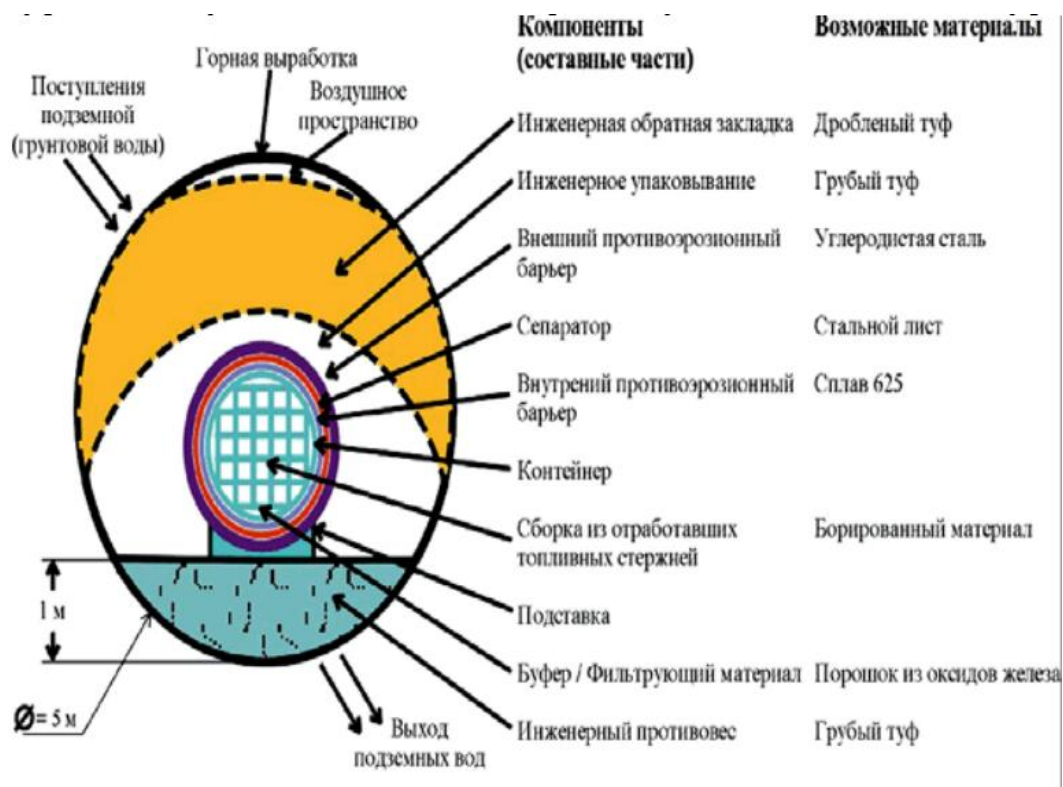


Рисунок 2 - Схема захоронения высокоактивных отходов

Перед захоронением концентрат ЖРО либо очищается, либо отверждается, либо, при получении высоконцентрированного солевого плава, размещается в контейнеры на хранение без дальнейшей обработки. То есть, в большинстве случаев даже после переработки радиоактивные отходы требуют дальнейшего кондиционирования либо отверждения и иммобилизации (инкапсуляции).

Кондиционирование включает в себя работы по созданию упаковки отходов, пригодной для транспортировки, перемещения, хранения и/или захоронения. На стадии кондиционирования также проводится иммобилизация ЖРО, их размещение в контейнерах и переупаковка при необходимости. Иммобилизация предполагает создание формы отходов за счет отверждения и включения радиоактивных веществ в матрицы (или инкапсуляции).

Хранение позволяет изолировать РАО с сохранением возможности их извлечения и обеспечивает охрану окружающей среды и мониторинг хранилищ в течение всего срока размещения в них радиоактивных отходов.

При транспортировке происходит физическое перемещение радиоактивных отходов в специальных упаковках. Так, ЖРО могут перевозиться из пункта сбора в пункты централизованного хранения и обработки, упаковки с кондиционированными отходами или из пункта обработки или хранения к месту захоронения.

Процесс захоронения представляет собой размещение отходов в соответствующем сооружении без намерения их изъятия. В некоторых странах мира контролируемые сбросы в окружающую среду нередко используются в качестве регулируемого варианта захоронения [7].

Наиболее распространенными матрицами для иммобилизации являются цемент, битум и стекло.

Соответственно, выделяют следующие методы обработки ЖРО без дополнительной очистки:

- цементирование – включение ЖРО (может быть также после концентрирования) в цементную матрицу. В некоторых случаях ЖРО объединяют при этом с твердыми РАО. В матрицу также добавляются специальные вещества – сорбенты и др. Основной недостаток метода - увеличение объема продукта при цементировании;

- битумирование – после предварительного концентрирования проводится включение солей из ЖРО в битумный компаунд. Но полученный в итоге продукт является горючим веществом. Это приводит к удорожанию его хранения. Поэтому данный метод применяется редко:

- остекловывание - включение солей из ЖРО в стеклоподобную матрицу. Чаще всего данный метод используется для кондиционирования высокоактивных отходов. Впрочем остекловывание успешно применяется и для среднеактивных отходов, и для низкоактивных отходов (после предварительного концентрирования). Также основной недостаток – низкая экономическая эффективность [8].

Одним из наиболее экономически выгодных решений является цементирование ЖРО, так как необходимые для цементирования материалы

сравнительно дешевы, хотя технология и увеличивает объем итогового продукта (рисунок 3) [10].

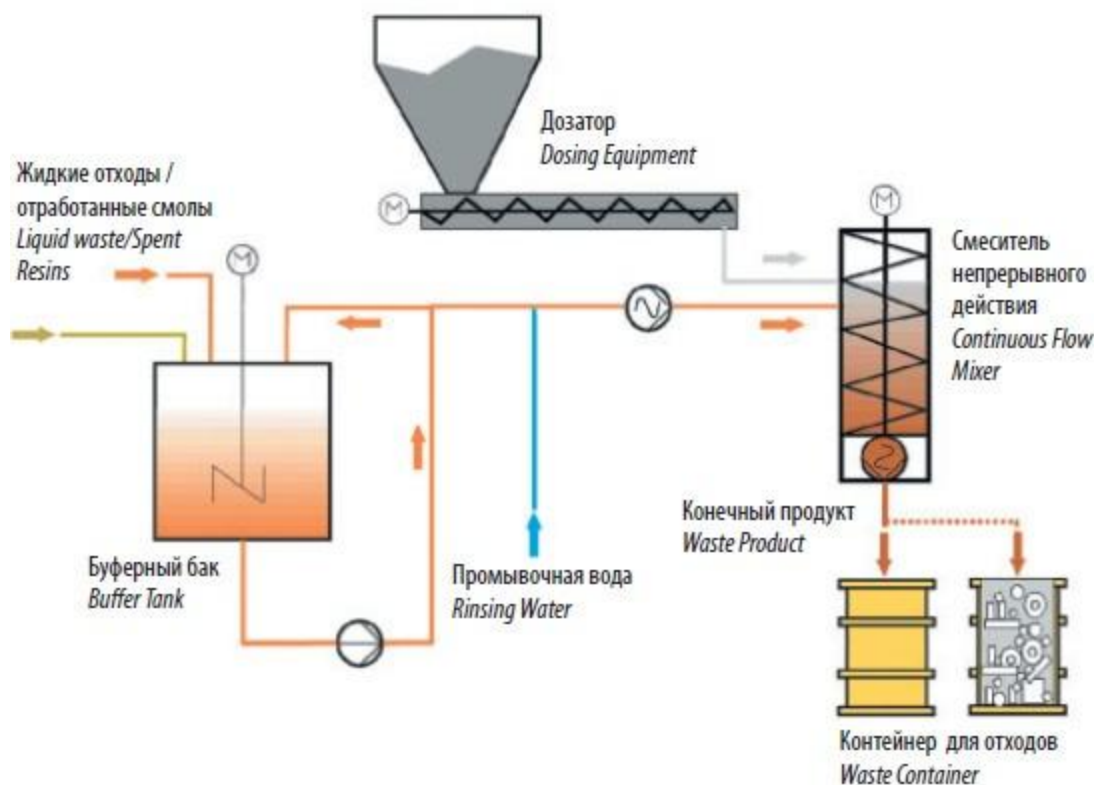


Рисунок 3 - Упрощенная схема технологии цементирования РАО компании AREVA NP

Остекловывание ядерных отходов в несколько раз уменьшает их объем и экономит дорогостоящее место в хранилищах. Но стоимость захоронения очень высока. Для иммобилизации радиоактивных отходов применяются два вида стекол – боросиликатные и фосфатные. Точный состав в различных странах варьируется и определяется, в основном, различиями в составе отходов. Основное требование к радиоактивному стеклу – удерживать радионуклиды.

Сегодня применяются два основных процесса варки стекла (рисунок 4):

- с кальцинацией перед варкой – двухстадийные процессы (Франция и Великобритания);
- без кальцинации (США, Россия, Германия, Бельгия, Япония, Индия, Южная Корея) [11].



Рисунок 4 - Схема остекловывания радиоактивных отходов

Жидкие радиоактивные отходы, получаемые при эксплуатации атомных электростанций, можно разделить на следующие категории:

- отработавшие ионообменные смолы;
- кубовый остаток испарителей;
- шлам из отстойников;
- фильтрационный шлам.

Западноевропейские страны, имеющие глубокие геологические хранилища, чаще применяют технологию высушивания кубового остатка из испарителей, шлама и ионообменных смол. В других странах Западной Европы, использующих приповерхностное захоронение отходов, ЖРО после переработки помещаются в герметичный контейнер и заливаются нерадиоактивным цементным раствором. При этом они по характеристикам приравниваются к зацементированным отходам [10]. В России обращение с жидкими радиоактивными отходами чаще всего осуществляется посредством цементирования или битумирования.

Еще один современный вариант иммобилизации радионуклидов в ЖРО – включение отходов в матричную композицию СИНРОК. Речь идет о керамике на основе титановых минералов цирконолита $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$, голландита $\text{BaAl}_2\text{TiO}_6$, перовскита CaTiO_3 и рутила TiO_2 . Следует отметить, что титановые минералы, входящие в состав СИНРОК, способны включать в виде твердых растворов практически все виды нуклидов. СИНРОК более стоек к выщелачиванию, чем боросиликатное стекло, и способен сохранять свою целостность в подходящей геологической среде свыше 1 миллиона лет [12].

Основными компонентами системы захоронения являются матрица и геологическая формация: отходы, включенные в матрицу, герметически упаковывают в металлические контейнеры и отправляют в скважины, пробуренные в геологической породе. От загрязнения среды радионуклидами используют дополнительный металлический контейнер (из нержавеющей стали), покрытый специальным защитным сплавом из коррозионно-стойких материалов (стали, никелевые или титановые сплавы). В качестве материала также используют засыпку или наполнитель, который располагается между контейнером с отходами и основной породой хранилища. В качестве основного материала засыпки нередко используют глину (к примеру, бентонит), а также ее смеси с другими материалами. Подбор состава смеси засыпного и буферного материалов способствует увеличению степени совместимости компонентов, которая необходима для поддержания химических условий, определяющих скорость водного транспорта в системе. Срок устойчивости такой многобарьерной системы изоляции составляет 1000 лет [9].

Наиболее перспективным способом захоронения отходов является размещение их под землей в глубинах устойчивых геологических формаций, стабильно существующих на протяжении миллионов лет. К таким формациям относятся соляные залежи, безводный гипс, осадочные породы - сланцы и глины, кристаллические горные породы типа гранитов, вулканические породы. В России чаще выбирают участки с водоупорными глинистыми породами, так

как глина обладает способностью сорбировать радионуклиды и рассеивать тепло, генерируемое при радиоактивном распаде внутри формы отходов.

В США для коммерческих отходов установлены ограничения объемной активности для 12 искусственных радионуклидов, при которых данные отходы могут захораниваться в приповерхностные могильники. По величине активности отходы разделены на три класса: А, В и С (отходы класса С имеют максимальную активность). Американская классификация предлагалась российскими ведомствами для применения на территории нашей страны. Однако, по мнению экспертов, критерии США неприменимы для России в отношении приповерхностного захоронения РАО вплоть до класса С по следующим причинам:

- классификация американцев разрабатывалась на протяжении длительного времени с широкой дискуссией и на фоне проведения соответствующих научно-исследовательских работ. В России ничего подобного не было;

- в класс С низкоактивных отходов в США попадают отходы, которые по российским меркам относятся к высокоактивным отходам и должны захораниваться в глубинные могильники;

- в основном к классу С в США относят зацементированные ЖРО, где отходосодержащая матрица покрывается дополнительно 15-сантиметровым слоем чистого бетона. В России данная технология не используется;

- на российских предприятиях не измеряется тот радионуклидный состав, который используется в Америке;

- при понижении степени угрозы какой-либо категории ЖРО, то есть при введении возможности приповерхностного захоронения отходов вплоть до класса С высок риск коррупции, уровень которой в данной области в США несравнимо ниже, чем в России [4].

В России сегодня закачка ЖРО под землю проводится в трех пунктах глубинного захоронения ФГУП «НО РАО»: на производственных площадках Красноярск-26 (Железногорск), Томск-7 (Северск) и в районе Димитровграда.

Эти объекты располагается на геологических формациях, которые удовлетворяют требованиям изоляции РАО. Закачка средне- и низкоактивных жидких отходов в глубоко залегающие геологические формации проводится на глубину в 260-450 м метров под давлением. Кроме того, выделяют полигоны глубинного захоронения (до 1500 м) и двухярусные полигоны: на глубине 160-300 м для низкоактивных отходов и на глубине 400-500 м для среднеактивных отходов [9].

1.2 Методы очистки ЖРО

Выбор способа очистки и обезвреживания радиоактивных сточных вод определяется комплексом характеристик радиоактивных веществ, к которым относятся:

- радионуклидный состав ЖРО,
- состав жидкой фазы,
- форма существования радионуклидов в растворе.

Радионуклидный состав ЖРО представлен элементами ядерного топлива ($^{233,235,238}\text{U}$, ^{239}Pu , $^{241,243}\text{Am}$), продуктами деления урана (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{129}I , ^{131}I , ^{144}Ce , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{152,154}\text{Eu}$, ^{140}Ba и др.), продуктами нейтронной активации конструкционных материалов ($^{58,60}\text{Co}$, ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe). Исходя из величины времени полураспада ($T_{1/2}$) и уровня вмешательства (УВ) самых распространенных радионуклидов, самыми опасными являются такие долгоживущие и радиотоксичные радионуклиды, как ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{60}Co , $^{235,238}\text{U}$, ^{239}Pu , ^{241}Am [3].

Радионуклиды в водных растворах в основном существуют в следующих формах:

- ионная: простые и комплексные отрицательно и положительно заряженные мономерные и полимерные ионы;
- молекулярная: нейтральные молекулы и незаряженные комплексы;
- коллоидная: истинные коллоиды;

- псевдоколлоидная: радионуклид осаждается на коллоидных частицах размером 0,001-0,1 мкм;

- грубодисперсная: радионуклид ассоциирован с частицами размером более 0,1 мкм.

Природа элемента и состав жидкой фазы определяет качественное и количественное распределение форм радионуклида. Чаще всего радионуклиды в составе ЖРО присутствуют в ионном, псевдоколлоидном и грубодисперсном состояниях. В ионном виде в нейтральных растворах находятся: радионуклиды цезия, стронция, радия – в виде простых катионов; уран – в виде комплексных карбонатных и/или сульфатных анионов. Грубодисперсное и псевдоколлоидное состояние характерно для радионуклидов легкогидролизующихся элементов: РЗЭ(III), Zr(IV), Nb(V), Fe(III), Co(II), Pu(IV), Am(III) и др. При этом при наличии в растворах минеральных взвесей и коллоидов (глин) цезий и стронций могут частично переходить в псевдоколлоидное и грубодисперсное состояние.

Соответственно, для удаления радионуклидов из жидких радиоактивных отходов используются следующие основные группы методов очистки:

- сорбционные методы – для удаления ионных форм радионуклидов, в первую очередь, цезия и стронция;

- методы соосаждения и мембранные методы (микро- и ультрафильтрация) – для удаления радионуклидов в коллоидной, псевдоколлоидной и грубодисперсной форме [3].

Сорбционные материалы, которые используются для очистки ЖРО, подразделяются на три основные группы:

а) Неорганические сорбенты различного состава:

- 1) природные и синтетические алюмосиликаты (цеолиты),
- 2) оксигидратные сорбенты,
- 3) соли поливалентных металлов и многоосновных кислот;

б) Органические ионообменные смолы (иониты);

в) Угольные и биосорбенты природного происхождения. В их состав могут входить:

- 1) гумусовые соединения (торф);
- 2) древесина и ее компоненты;
- 3) хитинсодержащие соединения, получаемые при переработке морских ракообразных (криль, креветка, крабы);
- 4) активированные угли и продукты их модифицирования.

Алюмосиликатные сорбенты природного или искусственного происхождения представляют собой соединения общей формулы: $\text{Me}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, где Me – это катион щелочного или щелочноземельного металла с валентностью n. Осаждение радионуклидов осуществляется за счет обмена подвижных катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} из сорбента на катионы раствора. Из-за относительно невысокой селективности данный тип сорбентов используется обычно для очистки малосолевых растворов. По кристаллической структуре алюмосиликаты подразделяются различаются на:

- сетчатые (цеолиты; например, клиноптилолит) - используются в качестве селективных ионообменных поглотителей радионуклидов стронция и цезия;
- слоистые (глинистые минералы, например, бентонит, каолинит, биотит, вермикулит и др.), которые обычно модифицируют, смешивая со связующими веществами.

Оксигидратные сорбенты – это соединения общей формулы $\text{MeO}_x(\text{OH})_y \cdot z\text{H}_2\text{O}$, где Me – Fe(III), Cr(III), Mn(IV), Si(IV), Sn(IV), Ti(IV), Zr(IV), Sb(V) и др. (сорбенты на основе силикагеля, оксигидратов титана, циркония, марганца и сурьмы).

Соли поливалентных металлов и многоосновных кислот (фосфаты титана и циркония, соли гетерополикислот, ферроцианиды переходных металлов) относятся к высокоселективным сорбентам.

Иониты – твердые, гранулированные, порошкообразные или волокнистые материалы, которые содержат в своем составе функциональные (ионогенные) группы, способные к обмену с анионами (аниониты) и катионами (катиониты). В ходе пропускания ЖРО через иониты происходит поглощение радионуклидов и иных, находящихся в растворе ионов. Данный метод малоэффективен, так как пригоден только для очистки растворов, содержащих не более 1 г/л растворенных солей.

Угольные и биосорбенты, полученные на основе природных органических веществ, производятся из постоянно возобновляемого сырья биогенного происхождения и могут быть утилизированы путем сжигания. Их недостатками являются низкая химическая стойкость и низкая селективность к радионуклидам цезия и стронция.

В основе мембранных методов очистки лежит преимущественная проницаемость одного или нескольких компонентов жидкой или коллоидной системы при перемещении раствора через разделительную перегородку-мембрану. Результат очистки зависит от размера пор применяемых мембран, то есть от размера фильтруемых частиц. Выделяют следующие виды баромембранных процессов:

- микрофильтрация - мембранное разделение на тонкопористых мембранах с размером пор от 0,05 до 10 мкм под давлением до 0,2 МПа;
- ультрафильтрация – мембранное разделение на тонкопористых мембранах с размером пор от 0,001 до 0,05 мкм под давлением 0,1-1 МПа;
- нанофильтрация – мембранное разделение на тонкопористых мембранах с размером пор от 0,0001 до 0,001 мкм под давлением 0,3-2 МПа;
- обратный осмос – мембранное разделение на мембранах с размером пор до 0,0001 мкм под давлением 2-10 МПа [13].

Для очистки растворов от нерастворимых форм радионуклидов чаще всего используются методы микро- и ультрафильтрации. Мембраны представляют собой двух- или многослойные системы, содержащие селективный слой, нанесенный на пористую подложку. Они изготавливаются

из неорганических материалов (нанокерамика, графиты, металлы) и органических полимеров (полисульфоны, полиимиды, сложные эфиры целлюлозы).

Наиболее эффективными для очистки ЖРО считаются неорганические мембраны на основе керамики, которые выпускаются в виде трубчатых элементов. Из таких элементов собирается фильтрационный модуль с различной площадью фильтрации. Загрязненный раствор подается внутрь фильтрующих каналов, а очищенная вода выходит через внешние стенки [3].

С конца прошлого века в России используется также метод термической очистки ЖРО искусственным вымораживанием с получением очищенной воды. В процессе обработки ЖРО происходит намораживание льда на металлической стенке вращающегося цилиндра, который охлаждается жидким хладагентом и находится в исходном растворе ЖРО. Намороженный лед удаляется с поверхности цилиндра и расплавляется с одновременным отделением от него захваченного концентрированного раствора. Процедура повторяется многократно до получения очищенной воды, удовлетворяющей санитарным нормам, что приводит в итоге к большим энергетическим затратам.

Еще один метод замораживания заключается в заливке исходного раствора отходов в емкость, помещенную в холодильную камеру, с последующим разделением льда и незамерзшего концентрированного раствора ЖРО. Полученный лед опять-таки плавится, а талая вода замораживается с последующим отделением незамерзшего концентрированного раствора в целях получения очищенной воды. На такой способ термической дистилляции также уходят значительные объемы энергии.

В варианте вымораживания, предложенном в 1999-м году предполагалось, что новый метод позволит повысить экономичность и эффективность обезвреживания ЖРО. Процесс вымораживания должен был проводиться путем одновременного перемешивания ЖРО с линейной скоростью не более 0,8 м/с и нагревании внутреннего дна емкости при поддержании температуры в интервале $+0,5 - +1^{\circ}\text{C}$. При достижении

среднесуточной отрицательной температуры раствора по крайней мере -3°C в течение не менее 48 ч начинался процесс сбора льда в очистной емкости. После сбора льда проводится его оттаивание в медленном режиме с одновременным его обмывом и удалением со дна очистной емкости захваченного льдом концентрированного радиоактивного раствора [14].

В России обычно применяется комплексная технология переработки, включающая несколько методов. На крупных предприятиях (радиохимические комбинаты, атомные станции и др.) действуют крупные стационарные комплексы для переработки ЖРО. Также в нашей стране активно используются мобильные установки небольшой производительности для переработки ЖРО. Из них самыми распространенными являются модификации установки «Аква-Экспресс», созданной специалистами ГУП «МосНПО «Радон». На предприятиях на Дальнем Востоке применяется плавучий морской комплекс очистки ЖРО «Ландыш» [8].

1.3 Современные тенденции в области очистки и захоронения ЖРО

В 2010 году специалисты из Северо-Западного международного центра чистых производств объявили о разработке инновационного метода гидроволновой очистки жидких сред. Суть метода состоит в том, что при прохождении раствора ЖРО через гидродинамический теплогенератор развивается эффект обтекания «плохо обтекаемого тела». При этом в жидкости формируются содержащие вакуум пустоты, внутри которых происходит процесс парообразования и идет он при относительно низких температурах (менее 100°C), что позволяет экономить энергию. На фоне дополнительного высокочастотного воздействия развивается эффективная термоокислительная реакция, приводящая к разрушению загрязняющих веществ. В ходе контактных теплообменных процессов происходит парообразование с последующей конденсацией. В конечном счете, образуется чистая дистиллированная вода и влажный иловый осадок, обладающий на данном этапе IV классом опасности

по российской классификации - токсичность отходов снижается, и из жидкой фазы они переходят в твердые шламы [15].

Основное отличие гидроволнового метода очистки - отказ от традиционных способов нагрева жидкости и замена их на механические и частотные воздействия (термодинамические циклы). Обычные теплообменные системы также сопровождаются образованием различных отложений, а новая технология лишена этого недостатка. Практика показала, что при помощи обратного осмоса объем очищенной воды доходит лишь до 35–40 % от исходного количества стоков, остальной загрязненный раствор становится концентрированным жидким высокоактивным «рассолом». При помощи гидроволнового метода можно очистить почти всю загрязненную воду в дистиллят. При этом на очистку кубометра сточных вод нефтеперерабатывающего завода таким методом потребуется лишь около 3 кВт·час [15].

Ларионов С.Ю. отмечает, что существующие на сегодняшний день метода очистки ЖРО по отдельности позволяют очищать раствор только от отдельных групп радионуклидов [16]. То есть, более качественную очистку ЖРО сложного радионуклидного состава можно провести только при помощи комбинации методов. Так, при выборе технологии очистки низкоактивных отходов, содержащих различные α -, β -, γ - излучающие радионуклиды, следует проверить эффективность селективного выделения радионуклидов осадительным и фильтрационным методами, после чего исследовать возможность применения современных технологий с использованием ионообменных смол [16].

Ярким примером эффективности современной комплексной технологии является российская разработка технологического процесса очистки тритийсодержащих ЖРО. Как известно, существуют разновидности ЖРО, которые практически не поддаются очистке от радионуклидов. Таковой является тритийсодержащая вода, которая в большинстве случаев направляется на длительное хранение, либо сбрасывается в окружающую среду, потому что

третий нельзя удалить из воды применяя классические методы переработки ЖРО [17]. Сегодня существует несколько методов очистки ЖРО с тритием:

- ректификация воды (WD-процесс): в основе очистки воды от трития лежит факт разницы в показателях летучести тритиевой воды (НТО) и H_2O . Давление H_2O при $60^{\circ}C$, в 1,056 раз больше чем давление НТО. Данная технология требует масштабного оборудования и больших энергозатрат на поддержание постоянной температуры;

- химический изотопный обмен в системе вода – водород, комбинированный с электролизом (CECE – процесс): в основе технологии лежит процесс изотопного обмена атомами водорода между молекулами воды и газообразного водорода. При этом тяжелый изотоп (третий) конденсируется в жидкой фазе согласно формуле: $HT(gas) + H_2O = НТО + H_2$. Данная технология требует большого расхода электроэнергии за счет электролиза всего объема ЖРО;

- двухтемпературный изотопный обмен в системе вода – водород (BNW – процесс): в основе данной технологии лежит та же реакция конденсации трития в жидкой фазе, что и в предыдущем примере, однако электролиз поступающей на переработку воды не производится, что приводит к снижению энергетических затрат. Недостаток технологии - высокое рабочее давление в колонне, которое составляет примерно 50 атмосфер и значительный объем газообразного водорода;

- двухтемпературный изотопный обмен в системе вода – сероводород (GS – процесс): в ходе процесса используются горячие и холодные колонны и циркулирующий в системе газ, как и в BNW-процесс, но в качестве газа используется сероводород. Недостатком данной технологии является использование высокотоксичного сероводорода под высоким давлением примерно 20 атмосфер [17].

Объединение перечисленных технологий в систему из трех последовательных узлов позволило добиться уменьшения концентрации трития в исходных ЖРО в 20000 раз:

- ректификационный узел (WD) очищает дистиллят трития от примесей солей и органических примесей, а также проводит предварительное концентрирование трития в 10 раз;

- двухтемпературный узел (BHW) позволяет повысить концентрацию трития в 10 раз;

- узел конечного концентрирования (CECE) трития повышает концентрирование трития до уровня $\approx 2,4 \times 10^{11}$ Бк/л (то - есть в 200 раз) и фиксирует его в виде твердого, устойчивого на воздухе продукта – тритида титана [17].

Предложенная схема, разработанная ООО "Атомпроект" (г. Москва) – проектной организацией госкорпорации "Росатом", в феврале 2015 года была заявлена как технология очистки загрязненных вод аварийной АЭС "Фукусима-1" в Японии от трития. На данный момент на "Фукусиме-1" впервые за историю человечества в одном месте скопились гигантские объемы жидких радиоактивных отходов. При этом концентрация трития в 100 раз превышает предельно допустимые нормы ВОЗ. Современные же технологии позволяют очищать отходы от радиоактивных изотопов цезия и стронция, но не от трития [18].

Активно развивается область разработки мобильных установок по очистке ЖРО. Сейчас российские мобильные установки серии «Эко» представляют собой законченную систему обработки ЖРО и включают в себя следующие компоненты:

- модули водоочистки с одновременным концентрированием радионуклидов;

- модуль размыва, забора и сгущения шламов из емкостей-хранилищ (это позволяет полностью освобождать емкости от ЖРО);

- модуль цементирования вторичных радиоактивных отходов (фильтрующих материалов, отработавших сорбентов, рассолов, фильтрационных и мембранных элементов), которые образуются при очистке ЖРО [19].

По итогам работы такой установки из ЖРО получают очищенную до норм радиационной безопасности воду, а также кондиционированные вторичные РАО, которые размещаются в стандартных металлических бочках (объемом 200 л) или стандартных невозвратных бетонных контейнерах типа НЗК.

Передвижная модульная установка «Аква-Экспресс» работает с применением сорбентов и ионообменных материалов, а также при необходимости использует ультрафильтрационный, микрофильтрационный и обратноосмотический аппараты. Очистка производится по технологической цепочке «избирательная сорбция – ультрафильтрация». Это дает возможность сбрасывать нерадиоактивные соли вместе с очищенной водой [19].

В области иммобилизации ЖРО во всем мире проводятся работы по совершенствованию характеристик стекла – материала матрицы. Основной упор делается на стойкость стекол к выщелачиванию водой при значительном разбросе температур, а также на уменьшение температуры синтеза стеклоподобных матриц. Рассматриваются также варианты разработки альтернативных – керамических, минералоподобных, стеклокристаллических и других вариантов матриц. Идут исследования также в области совершенствования технологий иммобилизации радионуклидов. Разрабатываются системы с СВЧ-нагревом, СВС-метод (самораспространяющийся высокотемпературный синтез), сверхстехиометрическая сорбция (процесс переработки радиоактивных отходов путем фиксации радионуклидов на силикагеле) и т.д.

Можно говорить о том, что сегодня продолжается процесс изменений на законодательном уровне в области классификации радиоактивных отходов и ЖРО, в частности. Использование опыта зарубежных стран осложняется особенностями социальной и политической системы в России.

У современных методов обращения с жидкими радиоактивными отходами отмечают следующие основные недостатки:

- метод цементирования приводит к увеличению объема продукта;

- метод битумирования удорожает хранение обработанных ЖРО;
- метод остекловывания также, как и метод битумирования, экономически невыгоден.

Вопросы совершенствования процессов сбора, очистки и захоронения ЖРО также являются актуальными на сегодняшний день. Помимо разработки технологий, сочетающих в себе комплексные решения и результаты современных научных исследований, идет процесс повышения экологической чистоты продуктов очистки ЖРО и увеличения степени защиты окружающей среды от возможного воздействия со стороны захороненных радиоактивных отходов.

ГЛАВА 2 Эколого-экономический эффект захоронения ЖРО

2.1 Оптимизация экологического эффекта захоронения ЖРО

При информационном обеспечении глубинных захоронений необходимо учитывать восприятие общественным мнением радиоактивных отходов как наиболее опасных, что не соответствует действительности. На практике обращение с радиоактивными отходами тщательно регламентировано нормативными документами, и фактическое их воздействие на окружающую среду на несколько порядков менее значимо, чем выбросы химических и металлургических комбинатов, выхлопах газов автотранспорта и т.д.

Общепринятый на Западе метод окончательной стадии обращения с РАО – это «вечное» захоронение (заявляются десятки тысяч лет и более, вплоть до миллиона!), что противоречит принципу действительной, а не заявляемой экологичности, поскольку не учитывает факторы будущего в достаточной степени, а именно [20]:

- отсутствие реальных гарантий безопасности захоронений на столь длительные сроки, это принципиально невозможно;
- противоречие имеющимся тенденциям расширения деятельности человека с ускорением развития технологий и т.д.;
- игнорирование рисков возникновения военных конфликтов и других социальных явлений глобального плана, а также существенных геологических и климатических изменений;
- нарушение известного принципа «экологичное всегда экономично»: «похороненные» переработкой безвозвратно ресурсы в будущем с высокой вероятностью будут востребованы;
- нарушение неизменности структур биосферы и геологических формаций, что не обеспечивают экологическую и геологическую эквивалентность во времени.

Важно отметить, что глубинное хранение ЖРО исключает таковые не только из биосферных, а также и социальных процессов: такое хранилище не

может быть использовано для террористических актов и других подобных действиях, повреждение наземной аппаратуры вплоть до полного разрушения не приведёт к радиоактивному загрязнению поверхности (точнее, будет незначительное — за счёт объёма ЖРО, ещё не закачанного на хранение и т.д.). Использование технологий перевода жидких радиоактивных отходов в твёрдую форму с последующим их хранением в специальных наземных и подповерхностных сооружениях значительно более потенциально опасны при катастрофах.

Обсуждаемая технология подземной изоляции жидких радиоактивных отходов полностью соответствует критериям Государственной концепции обращения с радиоактивными отходами в России [20]:

- критерий завершённости: «обеспечить удаление, наряду с радионуклидами, химических и биологических токсикантов, а также достичь в одном цикле концентрирования и локализации радионуклидов».

- критерий безопасности: «предпочтение должно быть отдано технологиям, обеспечивающим наименьший риск вредного воздействия на персонал, население и окружающую среду с учётом долговременных гигиенических, социальных, экономических, экологических и психологических последствий»;

- критерий доступности: «наиболее доступные, испытанные и готовые к промышленному применению технологии»; критерий экономичности: «наименьшие затраты для достижения цели».

Помещение жидких радиоактивных отходов в геологические формации на значительную глубину является общепризнанным способом, который может обеспечить требуемую изоляцию РАО. Используется метод нагнетания через скважины, по применению которого в России накоплен значительный теоретический и практический опыт. Метод используется уже десятки лет, при этом состояние захоронений соответствует ожидаемым прогнозам [21].

Однако, поскольку полигоны действуют уже значительное время, уже сейчас существует потребность поиска новых геологических формаций,

которые возможно использовать для подземного захоронения жидких радиоактивных отходов.

Экологическая опасность должна рассматриваться комплексно, с учётом различных путей распространения радионуклидов. Например, на организм человека радионуклиды влияют следующими основными способами:

- потребление загрязненной пищи и воды;
- дыхание загрязненным радионуклидами воздухом;
- прямое радиоактивное излучение от загрязненных материалов, включая почвы и др. объекты природы.

Требуется в обязательном порядке рассматривать как сценарии нормальной эволюции распространения радионуклидов, так и возможные вероятностные форс-мажорные сценарии.

Модель нормального сценария содержит расчёты диффузионного переноса радиоактивных веществ в различных элементах хранилища и их воздействие на окружающие геологические породы. Подразумевается стабильное запланированное функционирование всех барьеров, отсутствие неучтённых факторов, влияющих на ускорение переноса радионуклидов в области ближнего поля, сохранение значимых геохимических, гидрологических и других условий в ближнем поле в течение расчётного периода времени.

Альтернативный вероятностный сценарий рассчитывается, исходя из повреждения защитных барьеров, что приводит к контакту подземных вод с радиоактивными отходами, имеющему следствием ускоренное выщелачивание.

Жидкие отходы являются спецстоками лабораторий, работающих с соответствующими веществами. Часть отходов их предварительно концентрируется для сокращения объемов. Среди концентрированных растворов можно выделить:

- гидратнокарбонатные осадки после щелочно-содовой обработки регенераторов,
- гидратные осадки после коагуляции,
- маточники выпарных аппаратов.

Химические составы подобных концентратов обычно относительно стабильны по составу, между тем как растворы из научно-исследовательских институтов и производственных предприятий без предварительного концентрирования имеют высокое разнообразие химического и изотопного состава (таблица 2).

Таблица 2 – Радионуклидный состав ЖРО по их типам

Тип отходов	Часть общего количества	Объемная активность, 3,7 МБк/л						
		$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	^{137}Cs	^{144}Ce	$^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Ru}$	$^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$	^{14}C	$\Sigma\beta$
Гидратные пульпы	30	0,01–0,1	0,1	1	0,1	0,1	1	1
Гидратно-карбонатные пульпы	20	0,1	0,01	–	–	–	–	0,05
Маточники выпарных аппаратов	20	0,001	0,01	–	–	–	0,01	0,01
Регенерационные растворы	15	0,001	0,01	–	–	–	–	0,01
Низкосолевые растворы лабораторий	15	0,001–0,0001	0,001	–	–	–	–	0,005

Помимо самих радиоактивных отходов, утилизации также подлежат регенерационные растворы, образующиеся уже на самом пункте захоронения, получающиеся очисткой обмывочных вод, кубовые остатки, а также пульпы очистных сооружений.

Объемная активность жидких отходов по β -излучению находится в диапазоне 0,05-500 МБк/л и обуславливается присутствием ^{137}Cs , $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{14}C , ^{144}Ce , ^{106}Ru и др., при этом большая часть радиоактивности активности приходится на ^{137}Cs и ^{90}Sr [22].

Отдельной группой жидких радиоактивных отходов являются отходы от переработки использованных тепловыделяющих элементов АЭС, при переработке которых используются фторсодержащие растворы и азотная кислота.

Как при захоронении, так и предварительной обработке ЖРО требуется соблюдение принципов Международной комиссии по радиологической защите:

- **Оправданность деятельности:** никакая деятельность, связанная с облучением, не должна применяться, если она не даст однозначного положительного результата;

- **Оптимизация защиты:** дозы облучения должны соответствовать разумно достижимому низкому уровню с учётом особенностей экономических и социальных факторов территории;

- **Ограничение индивидуальной дозы:** эквивалентная доза облучения отдельных лиц от всей совокупности источников на предприятии не должна превышать установленных регулирующим компетентным органом пределов доз.

Риск для каждого индивида пропорционален эффективной эквивалентной дозе (H_E), полученной этим индивидом:

$$H_E = \sum_T W_T \times H_T \quad (2.1)$$

где W_T – весовой коэффициент отдельных тканей;

H_T – средняя эквивалентная доза в ткани T .

Эффективная эквивалентная доза имеет в основе концепцию равенства риска при равномерном и неравномерном облучении отдельных зон тела. В общем случае это не верно, но, с учётом статистичности параметра и вариабельности вероятных зон облучения, проведение дифференциации облучения по отдельным участкам тела человека не является целесообразным. Предел годовой дозы — 1 мЗв (доза облучения от естественных источников на душу населения за год в мире в среднем равна 2,4 мЗв, разброс составляет 1-10 мЗв [23]). Предполагается, что система радиационной защиты, обеспечивающая

указанную защиту для каждого человека как отдельного индивидуума, одновременно обеспечивает радиационную защиту других живых существ как минимум на уровне местной популяции.

Особое внимание следует уделять защите от радиологического ущерба в будущем (учитывать вероятность получения прогнозируемой дозы).

Аппаратный комплекс и методология сбора и хранения ЖРО должны обеспечивать:

- сепарацию радиоактивных жидкостей по радиоактивности и химическому составу для упрощения, удешевления и повышения безопасности последующей обработки каждой категории ЖРО;

- обеспечение сохранности системы трубопроводов: избегание подземных коммуникаций, использование двойных стенок, размещение в траншеях внутри зданий, минимизация осаждения частиц использованием незначительного уклона трубопровода и исключение резких изгибов, наличие индикаторов уровня и биозащиты;

- наличие достаточного объёма емкостей для хранения ЖРО с учётом аварийных условий, которые должны быть оборудованы сигнализацией верхнего и нижнего уровней и иметь систему перелива в запасную емкость, а также вентиляцию с соответствующей обработкой летучих радиоактивных газов;

- контейнеризацию объёмов ёмкостей в случае аварии: содержимое каждой емкости должно оставаться внутри всей структуры (также желательно предусмотреть откачку жидкости в запасную ёмкость);

- возможность отбора проб (если проба требует гомогенизации субстрата, должен быть предусмотрен соответствующий механизм);

- защиту емкостей от возможных сейсмических эффектов и др.;

- защиту контейнеров от ударных нагрузок;

- защиту контейнеров от экстремальных природных условий (жара, холод).

При выборе наиболее конкретного метода обработки жидких радиоактивных отходов с точки зрения экономики и экологии следует учитывать:

- количество ЖРО;
- возможность оборота жидкостей;
- наличие суспензированных материалов;
- химический состав растворов;
- кислотно-щелочной баланс растворов;
- уровень радиоактивности;
- конкретный состав радионуклидов;
- допустимые пределы выброса;
- риски для эксплуатационного персонала;
- критерии доступности метода;
- общие капитальные и эксплуатационные затраты;
- и т. д.

На опытно-промышленном полигоне филиала «Димитровградский» ФГУП «НО РАО» производится глубинное захоронение жидких низко- и среднеактивных отходов, образующихся в подразделениях АО «ГНЦ НИИАР». Соответствующие ЖРО являются нейтральными или слабощелочными растворами, при этом имеют переменный химический состав. С физической точки зрения имеют содержание осадкообразующих компонентов, суспензионных и эмульсионных частиц различной дисперсности, минеральных масел, а также поверхностно-активных веществ.

Средний радионуклидный состав поступающих на захоронение ЖРО представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Радионуклидный состав ЖРО

Наименование радионуклида	Содержание в %
Cs-137	57,6
Cs-134	13,4
Eu-152, 154	9.1
Co-60	1.9
Zn-65	1,1
Mn-54	1,4
Ce-144	5,7
Ru-103	2,1
Ru-106	4,6
Zr-95	1,2

Технологическая схема передачи захоронения ЖРО реализована в соответствующей установке (рисунок – 5).

Технологическая схема обработки ЖРО включает в себя следующие операции:

- сбор, усреднение и естественное отстаивание ЖРО в ёмкостях В-81, В-83/2, В-84 и В-83/1 здания 138 (рисунок – 6);
- выдача усредненных ЖРО из приемных ёмкостей для подготовки к подземному захоронению (насосы В-91/1-3 и В-90/2-3 в зд.189);
- перекачка отходов в баки (В-270 и В-253);
- закачка ЖРО в ОПП (насосы В-147/1-3);
- оперативный контроль процесса закачки;
- сбор имеющихся протечек ЖРО от оборудования;
- контроль технического состояния сооружений ОПП;
- гидрогеологический мониторинг в пределах горного отвода;
- учёт ЖРО, поступивших в ОПП.

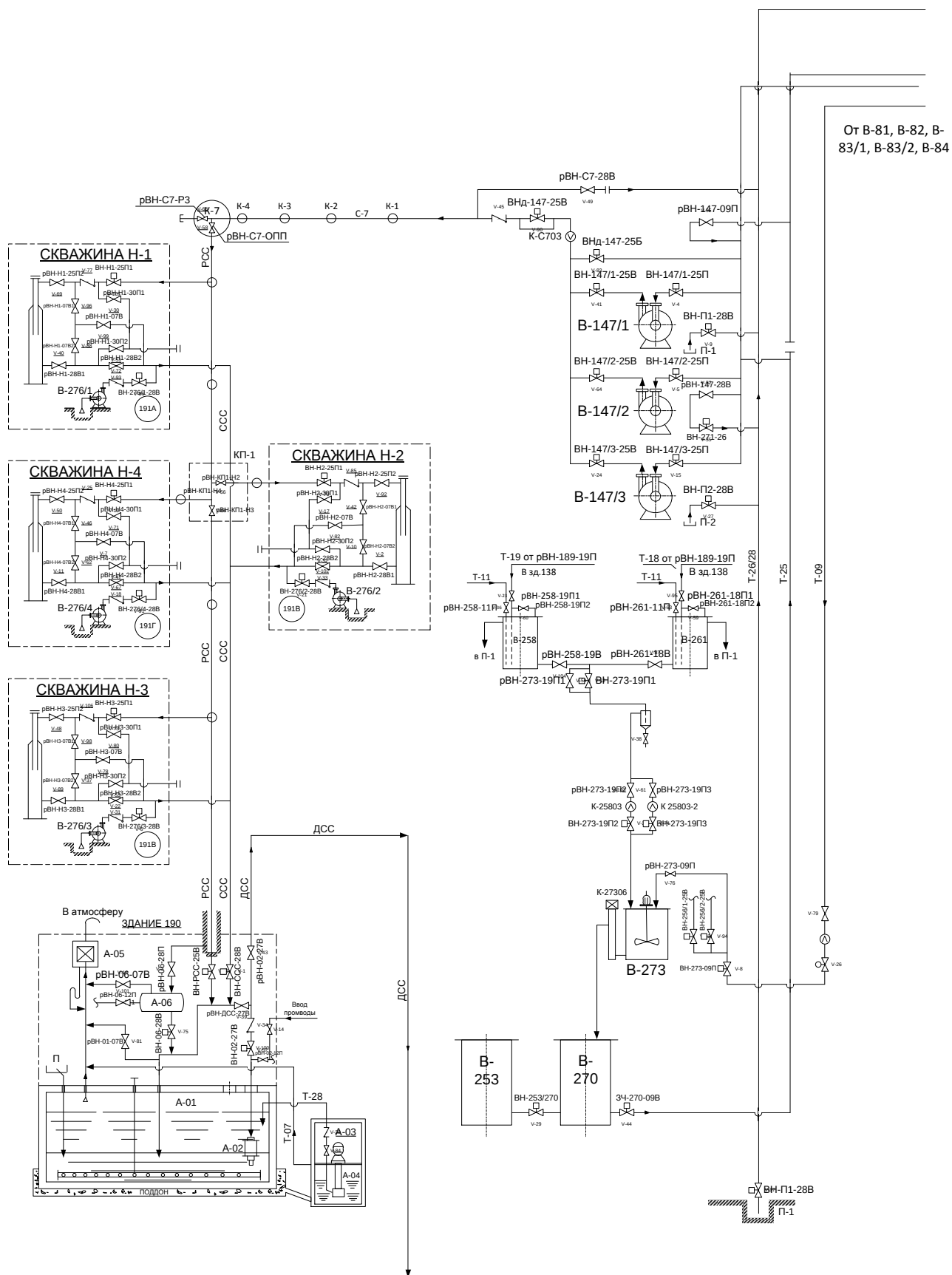


Рисунок 5 – Технологическая схема захоронения ЖРО

Для экологической защиты окружающей ООП среды на стадии переработки важен первый пояс санитарно-защитной зоны, который включает территорию размером около 20 га, на которой расположены технологические сооружения, в частности — нагнетательные скважины и подводящие напорные трубопроводы.

На территории первого пояса санитарно-защитной зоны запрещена любая производственная деятельность, которая не связана непосредственно с эксплуатацией полигона, запрещён проезд автотранспорта и закрыт проход людей.

Территория обустроена системой дренажных канав, предназначенных для перехвата радиоактивных жидкостей в случае аварийных проливов, вызванных разгерметизацией трубопроводов или ёмкостей хранения ЖРО ООП.

С точки безопасности наиболее опасными участками технологического процесса на ООП являются:

а) На этапе подготовки ЖРО к удалению в ОПП:

- 1) ёмкости для хранения химреагентов и соответствующие коммуникации, где возможен разлив кислотой или щелочью;
- 2) насосное и электрооборудование — возможны поражения электрическим током, искры и короткие замыкания;
- 3) напорные коммуникации и арматура в здании 138;

б) На этапе процесса закачки ЖРО:

- 1) напорные коммуникации и арматура в здании 138 Н;
- 2) то же в оголовках и узлах управления нагнетательных скважин и здания 190.

На указанных участках работ необходимо строгое соблюдение правил безопасности и технической эксплуатации. Необходимо понимать, что авария на ООП, изначально не связанная непосредственно с утечкой радиации, очень легко может вызвать такую косвенно: едкие вещества могут повредить наружную изоляцию, короткое замыкание может привести к пожару, который,

в свою очередь, может вызвать деформацию арматуры с нарушением герметичности трубопроводов и ёмкостей, и т.д.

Защита персонала и окружающей среды от радиоактивного излучения, а также выхода РАО за пределы сооружений ПГЗ ЖРО ОПП обеспечивается биологической защитой в рамках уровня облучения не выше допустимого. На ОПП в Димитровграде материалами биологической защиты служат:

- бетоны различных марок, подобранных с учётом условий эксплуатации и предназначения сооружений;
- стали различных марок, из которых выполнены корпуса резервуаров, детали аппаратов, трубопроводы, а также различные механизмы и конструкции;
- грунтовой слой, экранирующий наземные трубопроводы и резервуары, а также боковые стены подвальных помещений.

Геологическая среда, позволяет надёжно изолировать ЖРО в III и IV эксплуатационных горизонтах, но этот вопрос относится к процессу хранения ЖРО в геологических отложениях, и не входит напрямую в рамки этой работы.

Конструктивные особенности ОПП предусматривают безопасность при проектных авариях, т.е. отсутствие превышения установленных доз облучения работников на объекте и населения за пределами промплощадки ПГЗ ЖРО ОПП. Исходными событиями проектных аварий могут стать [24]:

- внешние воздействия природного и техногенного происхождения, свойственные району размещения ПГЗ ЖРО. При анализе сейсмических явлений необходимо рассматривать максимальное расчетное землетрясение;
- полное прекращение энергоснабжения;
- отказы оборудования систем обращения с ЖРО;
- разгерметизация оголовков нагнетательных скважин;
- концентрирование радионуклидов в породах поглощающих горизонтов и разогрев интервалов горизонта до температуры парообразования в пластовых условиях;
- газообразование в поглощающем горизонте вследствие радиационно-химических процессов или химических реакций;

- вертикальная фильтрация отходов в слабопроницаемом горизонте, перекрывающем горизонт, содержащий ЖРО, и загрязнение буферного горизонта в окрестностях нагнетательной скважины;

- расконсервация скважин из-за коррозии обсадных колонн и разрушения цементного камня, возникновение вертикальных перетоков по стволам скважин, загрязнение вышележащих горизонтов.

На всех стадиях обработки ЖРО происходит образование и, соответственно, накопление радиоактивных осадков. Обычно они образуются в отстойниках и приёмных ёмкостях на стадии предпочистки отходов вследствие коагуляции частиц раствора в виде шламов, что происходит при смешении отличающихся по химическому составу отходов — возможно достижение предела растворимости отдельных компонентов, создание условий для коагуляции мицелл коллоида и др. При этом упомянутые процессы зачастую сопровождаются сорбцией и соосаждением радионуклидов раствора, и удельная активность возникающих шламов значительно выше, чем изначальных ЖРО.

Вплоть по настоящее время локализация пульпообразных шламов осуществляется через сбор и отправку на долговременное хранение в специальных ёмкостях. Этот способ обладает очевидными недостатками:

- требуются всё большие объёмы для хранения;
- высокая стоимость таких хранилищ;
- ограниченность срока их использования;
- очень серьёзные последствия в случае реализации потенциальной возможности аварий.

С 1966 года обезвреживание ЖРО на ОПП Димитровграда проводится методом подземного захоронения, что позволило значительно сократить количество радиоактивных кубовых остатков, требующих хранения в специальных емкостях. Тем не менее, скорость заполнения наземных хранилищ среднеактивными пульпами остаётся значительной (около 400 м³/год).

Анализ накопления описанного концентрата в хранилищах позволяет сделать следующие выводы:

- около 50% образуется в виде пульп на стадии сбора и смешивания ЖРО в приёмных емкостях;
- около 40% — при подготовке ЖРО к глубинному захоронению;
- около 10% — это дезактивационные растворы защитных камер, регенерационные растворы и т.д.

Используемая технология сбора отходов в настоящее время производится последовательно в три приемные емкости (по 2000 м³), в которых происходит усреднение поступающих ЖРО и частичное осветление растворов вследствие отстаивания с образованием осадка, после чего осуществляется закачка и захоронение в геологических формациях.

Выполнение операций по промывке фильтровых зон скважин является обязательным условием нормальной эксплуатации, поскольку в конце цикла закачки происходит частичная коагуляция взвешенными частицами. Важно, что осуществление промывки не приводит к восстановлению приемистости скважины в полном размере, и приходится периодически промывать не только фильтровую зону, но и скважину путём закачки промывной жидкости. Таким образом, исследования на тему сокращения затрат на подготовку промывочных жидкостей имеют большое практическое значение.

Анализ динамики количественных и качественных показателей химического состава ЖРО, поступающих в приёмные ёмкости, показал, что в течение суток наблюдаются циклические изменения физико-химического состава растворов. Например, pH ночных поступлений в среднем равен 7,4, а дневных — 7,6. Мутность раствора ночью — в среднем $6,4 \times 10^{-3}$ г/см⁻¹, дневных — 22,0 г/см⁻¹. В несколько раз отличается содержание оксалатов, фосфатов, сульфокислот, железа, нитратов, хлоридов и др.

Наблюдение имеет очевидную естественную причину: основные работы по ремонту и дезактивации технологического оборудования, равно как и дезактивация использованной спецодежды, проводятся днем. Таким образом,

дневные ЖРО характеризуются значительно большим содержанием солей, жёсткостью, содержанием минеральных масел, взвешенных механических частиц и поверхностно-активных веществ.

Вследствие вышесказанного, целесообразно осуществлять сбор, хранение и переработку поступающих отходов дифференцированно, при этом выделение дезактивационных отходов и вод спецпрачечной в отдельный технологический процесс позволит исключить возможность смешения этих растворов, с другими, относительно «чистыми» водами их бассейнов выдержки и др., при этом этот отдельный поток целесообразно разделять на «дневной» и «ночной» циклы, что также целесообразно с точки зрения оптимальной обработки ЖРО перед закачкой в скважины.

Однако имеющееся в настоящее время оборудование ОПП не позволяет производить требуемую сепарацию поступающих ЖРО, производя их специфичную обработку, имеется возможность лишь перенаправлять потоки в различные хранилища, что имеет смысл делать для всех поступающих ЖРО по признаку «день/ночь», что даёт увеличение эффективности, но меньшей, чем если бы входные потоки можно было бы дифференцировать и по источникам ЖРО.

Итак, изучение свойств отходов, поступающих на переработку, и исследование процессов осадкообразования на стадиях сбора и усреднения ЖРО позволили научно обосновать и разработать методику сепарированного сбора жидких отходов, что даёт возможность сократить накопление осадков в приёмных емкостях на $100 \text{ м}^3/\text{год}$, т.е. приблизительно на 25%.

Тем не менее, остаётся экологическая опасность аварии хранилищ на поверхности, при этом объём потребных хранилищ со временем лишь растёт, а их длительный срок эксплуатации увеличивает риски аварии.

Следовательно, действия, направленные на снижение темпов заполнения хранилищ пульпообразными осадками средней активности, связаны с необходимостью разработки технологии их утилизации путём захоронения в геологических формациях через скважины ОПП.

Следует учитывать, что удалять в подземное хранилище, согласно действующим нормам, допустимо только нейтральные по кислотности растворы, поэтому необходима соответствующая обработка, которая должна проводиться отдельно для каждой группы растворов со значительно отличающимся значением pH. Кроме того, итоговый раствор не должен оказывать коррозионного воздействия на используемое технологическое оборудование, а после закачки в скважину — не должен вызывать нарушений в структуре пород слоя-коллектора, снижая его фильтрационные и поглощающие свойства, что требует тщательного предварительного изучения состава пульпы и получаемых растворов.

Таким образом, с экологической точки зрения целесообразен отдельный сбор и усреднение ЖРО от различных источников, при этом в некоторых случаях — с дифференциацией по времени, с дальнейшей переработкой и удалением пульпообразных отходов в подземное хранилище, что значительно снижает экологические риски территории.

Изменение экологической безопасности в результате применения данных рекомендаций не представляется возможным выразить в численной форме, поскольку единственно приемлемой ситуацией является отсутствие радиоактивного заражения местности, однако уменьшение количества радиоактивных веществ, находящихся на поверхности, в т.ч. внутри аппаратуры, трубопроводов и т.д., однозначно снижает опасность радиоактивного заражения территории при форс-мажорных обстоятельствах.

2.2 Оптимизация экономического эффекта захоронения ЖРО

Проблема обезвреживания (изоляции) радиоактивных отходов, в частности, жидких, имеет большую значимость не только с экологической точки зрения, но и с экономической [25].

Постоянно растущие объемы радиоактивных отходов на функционирующих и планируемых в будущем добывающих, обогатительных и перерабатывающих производствах, объектах атомной энергетики, а также

других отраслей, создающих отходы такого рода, в рамках Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами требуют комплексного подхода для решения всего спектра проблем, связанных с обсуждаемой темой.

С точки зрения экономики утилизация жидких радиоактивных отходов требует значительных капитальных вложений, объёмы которых зависят от типа ЖРО, количества доступных объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов и их качеством, а также условиями подготовки, контейнеризации, транспортирования, консервации и последующего мониторинга состояния хранилища.

В общем виде эксплуатационные затраты технологического процесса цикла обращения с ЖРО должны обеспечивать:

- подготовку материалов (извлечение из рабочей зоны, опциональную переработку),
- транспортирование ЖРО до места изоляции (контейнеризация отходов, транспортировка и соответствующие погрузочно-разгрузочные операции),
- окончательную изоляцию РАО на объектах окончательной изоляции.

Соответственно, экономические расчёты утилизации ЖРО должны учитывать тип объекта изоляции, который будет применяться, а также логику перемещения ЖРО к месту захоронения.

При расчёте себестоимости потребных для этого задач необходимо осуществить стоимостные количественные оценки с учётом окончательной консервации ЖРО и мониторинга состояния объекта захоронения. Следует учитывать перспективные объёмы ЖРО, а с финансовой точки зрения — волатильность стоимости технических операций относительно текущих цен.

Захоронение ЖРО возможно в уже существующих объектах изоляции, но со временем неизбежно возникнет потребность строительства новых. Экономическая модель строительства объекта утилизации ЖРО должна учитывать следующее:

- капитальные вложения на разработку всей системы обращения с радиоактивными отходами,
- строительство объекта с распределением по структурно-технологическим составляющим компонентам, а именно: горные и буровые работы, строительные и монтажные работы,
- стоимость необходимого оборудования,
- дополнительные расчёты по вспомогательным подразделениям и объектам, входящим в структуру окончательной изоляции ЖРО;
- распределение общих и удельных (соотнесенных на 1м^3 ЖРО) финансовых вложений по всем стадиям и видам работ, начиная с проектной;
- изыскание места размещения хранилища,
- лицензионные расходы,
- приобретение земельных участков,
- расходы на обслуживание кредитных договоров, связанных с сооружением объекта изоляции ЖРО,
- расходы на выплату нормы доходности инвестированного капитала.

При расчёте экономических показателей должен учитываться фактор времени как в плане возможности изменения банковских ставок и процентов по кредитам, так и в плане рисков различного рода — политических, социальных и др., если их влияние на строительство и эксплуатацию хранилища имеет место.

Следует разделять объективные и субъективные параметры, влияющие на экономическую модель [26]. Физические показатели имеют объективный характер: геологическая картина региона, параметры пластов, физико-химические свойства ЖРО, параметры оборудования и т.д. Однако стоимостные показатели в значительной степени зависят от субъективных факторов: соображений безопасности, экономической конъюнктуры и т.п., при этом субъективные факторы меняются во времени и взаимодействуют между собой сложным образом, что затрудняет моделирование их воздействия. Иногда социальные факторы могут действовать против всякой логики — так, после аварии на «Фукусиме» решения о закрытии европейских АЭС

принимались по результатам работы комиссии, в состав которой входили не только профильные специалисты, но представители гуманитарно-духовной сферы [27], выдвигавшие этические вопросы как значимые в технической области, что напрямую противоречит научной методологии.

Итак, для осуществления надежной и безопасной изоляции отходов необходимо учитывать следующие факторы [28]:

- природа отходов,
- уровень радиоактивности,
- физическая форма отходов,
- физико-технические и физико-химические характеристики отходов,
- объемы отходов, направленных на изоляцию,
- требования химической и радиационной безопасности,
- технологические требования по обращению с отходами во время их размещения в подземном сооружении и на весь период изоляции,
- наличие геологической формации, удовлетворяющей требованиям надежной изоляции,
- природно-климатические и географические условия,
- социально-экономические.

Отрасли, которые находятся в непосредственном обращении с радиоактивными отходами, требуют почти нигде более не применяющихся решений не только в технологической области, но и организационной, информационной и других. Как следствие, в экономике имеет место специфично и при этом изолированно функционирующий сектор, принципиально не имеющий возможности перепрофилирования. Например, транспортно-упаковочный комплект представляет собой сложное высокотехнологичное устройство [29], и он может использоваться именно и только для обеспечения радиационной защиты в соответствии с экологическими и санитарными требованиями, а также выдерживать проектные нагрузки, химически агрессивную среду и т.д., включая аварийные ситуации в

процессе эксплуатации. Использование транспортно-упаковочный комплекта для радиоактивных отходов для каких-либо иных целей не целесообразно.

Подотрасль утилизации радиоактивных отходов имеет межрегиональные, общегосударственное значение, и даже международное. Таким образом, с экономической точки зрения она может оказать эффект мультипликатора, то есть стимулирующее воздействие на развитие экономики региона в целом: вместе с новой отраслью будут развиваться специализированные средства транспорта и другие инфраструктурные отрасли вспомогательного по отношению к основной задаче хозяйства.

Для построения экономической модели, учитывающей региональные связи, целесообразно использовать институциональную парадигму, при этом должны выполняться следующие факторы [30]:

- однозначное разделение эндогенных и экзогенных переменных;
- экзогенные переменные модели должны иметь прямое соответствие институтам региона, учитываемым в модели;
- требуется учёт задач и ресурсов, имеющихся у региона (и соотносящихся с объектом изоляции ЖРО);
- модель должна быть динамической, при этом не только адекватно описывать современное состояние территории, но и иметь прогностические возможности в достаточной для практического применения степени.

Институциональный подход можно в максимально обобщённом виде представить в виде следующего алгоритма:

- определить список институтов как объектов модели;
- определить список мезоэкономических систем, обязательных для использования в модели;
- составить списки их параметров, оптимизировать таковые;
- установить наличие связей институтов в рамках исследуемой системы и определить соответствующие характеристики;
- проанализировать эволюцию региональных институтов;

- разработать методы прогнозирования изменения мезоэкономических параметров рассматриваемой системы вследствие изменения параметров используемых в модели институтов.

Объекты утилизации радиоактивных отходов как высокотехнологические предприятия могут играть значительную роль в экономике региона не только в плане непосредственных налоговых отчислений, но и в плане сотрудничества с профильными вузами в плане подготовки профильных специалистов [31], особенно в малых городах [32] как системообразующий фактор территориального социально-экономического партнёрства региональных организаций [33]. Профильные вузы могут осуществлять не только подготовку студентов по соответствующим специальностям, но и разрабатывать и преподавать программы дополнительного образования и повышения квалификации [34], разработанные с учётом специфики конкретного объекта изоляции ЖРО.

Впрочем, следует отметить, что настолько подробная детализация взаимоотношений организаций в регионе с точки зрения общей теории систем чрезмерно усложняет экономическую модель объекта; однако при наличии описанного фактора его следует учитывать как экзогенную переменную.

Производство буровых работ, закачка ЖРО в находящиеся под воздействием высоких температур и давлений подземные гидротермальные системы требует повышенной надёжности и точности вследствие необходимости соблюдения радиационной безопасности, что, в свою очередь, требует научно-технического обеспечения решений соответствующих задач. Помимо очевидных даже неспециалистам проблем, имеется множество локальных и специфических вопросов, например, обоснованность выбора размещения высокоточной измерительной аппаратуры в глубинных слоях, что также нуждается в разработке и производстве от опытного до серийного. Таким образом, возникает множество факторов, которые могут простимулировать развитие сложного наукоемкого комплекса региона на передовом научно-техническом уровне.

Однако необходимо понимать, что привлекательность развития экономики региона на практике может быть реализована лишь при полной гарантии локализации и изоляции ЖРО в физико-химически устойчивые геологические объекты.

Как следствие, полноценная экономическая модель должна включать расчёт следующих типов рисков с экономической точки зрения:

- прямых и косвенных,
- непосредственных и кумулятивных,
- приближенных по времени и отдаленных,
- в пространстве самого объекта и во влиянии на другие хозяйственные объекты, население и природу.

Особое внимание необходимо уделить возможным трансграничным переносам радиоактивных веществ и их распространению на природные системы в глобальной взаимосвязи, а также социально-экономические системы международного значения.

При этом необходимо оценивать не только возможный ущерб, но и затраты на ликвидацию негативных последствий утечек радиоактивных веществ и др. Сложность в том, что стандартные методы оценки подобных форс-мажорных обстоятельств с экономической точки зрения не работают: для объектов ядерной энергетики, в частности изоляции радиоактивных отходов, затраты на ликвидацию последствий аварии могут превысить объем капиталовложений в целом в совокупности с ожидаемой прибылью. Даже без учёта социальных последствий невозможно заранее достоверно каким-либо образом прогнозировать затраты. Таким образом, экономическая модель должна предусматривать расходы не на «компенсаторно-страховочный фонд», а на повышение надёжности объекта.

Данные о стоимостных характеристиках мероприятий по изоляции радиоактивных отходов разноречивы, что объясняется соображениями коммерческой тайны в этой прибыльной сфере мировой экономики. Встречаются данные о стоимости захоронения 1 м³ жидких радиоактивных

отходов в диапазоне 1 - 10 тысяч долларов США [35], но при этом не указывается их радио- и химическая активность, так что данные не представляют практической ценности. В целом специалисты считают, что пока стоимость переработки отходов будет увеличиваться вследствие того, что строятся новые перерабатывающие предприятия, пройдет, видимо, много лет, прежде чем вся цена захоронения радиоактивных отходов будет с точностью установлена [36].

Законодательно услуги по захоронению радиоактивных отходов регулируются Постановлением Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 1249 «О порядке государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов».

Законодательно введен принцип «Затраты на обращение с РАО на полном цикле, включая захоронение, несут организации, в результате деятельности которых образовались такие РАО» (ранее — до отгрузки).

Следует отметить следующую специфику:

- расходы организаций на начальных стадии обращения с радиоактивными отходами в настоящее время с экономической точки зрения «растворены» в основных видах деятельности;
- рынок услуг по кондиционированию и последующей перевозке радиоактивных отходов в России в настоящее время практически отсутствует;
- стоимость захоронения радиоактивных отходов регулируется государством по устанавливаемым тарифам, поскольку эта область деятельности является естественной монополией.

Государственное регулирование тарифов преследует следующие цели [37]:

а) создание условий для безопасного функционирования и динамичного развития единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами;

б) обеспечение деятельности национального оператора по обращению с радиоактивными отходами (далее — национальный оператор) экономически

обоснованным объемом финансовых ресурсов, необходимых для реализации его производственной и инвестиционной программ;

в) достижение баланса интересов национального оператора и организаций, в результате деятельности которых образуются радиоактивные отходы;

г) обеспечение доступности услуг по захоронению радиоактивных отходов и защита экономических интересов организаций, в результате деятельности которых образуются радиоактивные отходы, от необоснованного повышения цен на захоронение радиоактивных отходов».

Экономическая модель должна быть системной, при этом при сохранении технологических и экологических целей эмерджентные цели в экономическом плане могут отличаться.

Например, модель потенциального самостоятельного бизнеса в рассматриваемой области будет включать следующие процессы:

- Оказание услуг по подготовке ЖРО к захоронению;
- Услуги по извлечению накопленных на предприятии ЖРО;
- Упаковка, погрузочные работы;
- Транспортировка до объекта захоронения;
- Разгрузка и размещение в объекте изоляции ЖРО.

(Не обязательно использовать всё процессы, например, может быть организовано предприятие, занимающееся именно транспортировкой контейнеров с ЖРО).

Экономическая модель «Звено в цепочке создания стоимости» будет включать следующие процессы:

- организация ключевых для отрасли продуктов и услуг с учётом конкурентоспособности;
- разработка «под ключ» локальных и региональных инфраструктур обращения с радиоактивными отходами;
- и т.д.

Также конкретные экономические модели могут отличаться в деталях, оптимизация которых зависит от институциональных факторов.

Например, оплата услуг может проводиться:

- по факту передачи ЖРО на утилизацию;
- по факту образования ЖРО на предприятии с последующей корректировкой при отгрузке.

Другой пример: предприятие, производящее ЖРО, может лишь оплачивать изоляцию, а может инвестировать в строительство объектов изоляции ЖРО на тех или иных условиях.

Для экономического подхода к концепции «польза – вред» используется понятие коллективная эквивалентная доза ($KD_{\text{эв}}$), получаемой при соответствующем облучении при нормальной или аварийной работе [38]:

$$\sum KD_{\text{эв}} = \int_0^{\infty} D \cdot N(D) \cdot dD, \quad (2.2)$$

где $N(D)dD$ — число лиц, получивших эквивалентную дозу в диапазоне от D до $D + dD$,

Для суммарной оценки радиационной опасности за все время существования создаваемой соответствующей технологией радиоактивности используется понятие «ожидаемой (коммитментной) индивидуальной и коллективной доз».

Ожидаемая коллективная доза определяется в общем виде следующим образом:

$$KD_{\text{эв}} = \int_0^{\infty} KD^{\circ}_{\text{эв}}(t) dt, \quad (2.3)$$

где $KD^{\circ}_{\text{эв}}(t)$ — коллективная мощность дозы в момент времени t ;

$$KD^{\circ}_{\text{эв}}(t) = \int_0^{\infty} D^{\circ} \frac{dN(D^{\circ})}{dD^{\circ}} dD^{\circ}, \quad (2.4)$$

где D° – мощность дозы облучения отдельного лица; $dN(D^\circ)/dD^\circ$ – распределение отдельных лиц по значению полученной дозы в момент времени t .

В таком случае средние ожидаемые индивидуальные дозы определяются как:

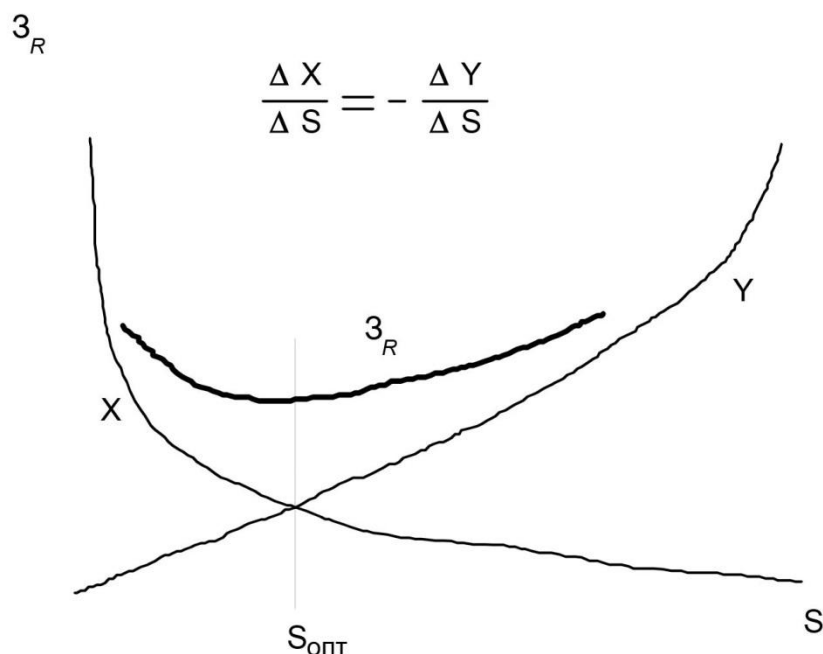
$$D^c = \int_0^{\infty} \frac{KD_{\text{ср}}(t)}{N(t)} dt. \quad (2.5)$$

Таким образом, любая заданная степень защищенности объекта характеризуется в целом коллективной дозой $KD_{\text{ср}}$. Соответственно, чем больше доза, тем меньше степень защищенности в текущий момент времени и тем выше остаточная радиационная опасность. Таким образом, повышение требований к радиационной безопасности сильно увеличивает затраты на защиту, поскольку сколь угодно малое значение дозы в любом случае имеет определенный риск, и любой полученный уровень дозы приводит к нанесению некоего вреда Y .

Следовательно, уменьшение дозы облучения снижают потери на недостаточную защищенность (Y), но при этом значительно возрастают затраты на достижение этого уровня безопасности (X). Эта ситуация схематически проиллюстрирована на рисунке 7.

Таким образом, при построении модели объекта изоляции ЖРО и сопутствующих этому процессов быть учтены следующие специфические вопросы:

- соответствие разрабатываемых моделей реально протекающим физико-химическим и технологическим процессам при подготовке РАО, их транспортировании и изоляции;
- использование блочно-модульной структуры модели, соответствующей реальным процессам с технологической и экономической точек зрения;
- чёткое соответствие технологической основе процессов обращения с РАО, использование однозначных условий применения, технических показателей, физических параметров и т.д.;



где S – достигнутый уровень коллективной дозы ($KД_{э3}$);
 X – общая стоимость достижения данной $KД_{э3}$;
 Y – общая стоимость ущерба, причинённого $KД_{э3}$;
 $Z_R = X + Y$.

Рисунок 7 – Дифференциальный анализ затрат и пользы

- однозначная постановка решаемых задач на каждом этапе, формулирование простых и обоснованных критериев выполнения задачи;
- многоплановость и пролонгированность модели, учёт динамики изменений условий и т.д.

В результате становится возможным разработать модель с функционально-аналитическими количественными зависимостями параметров, включая экономические (т.е. установить правила изменения стоимостных показателей от величины воздействия влияющих естественнонаучных и технологических факторов).

В контексте работы экономический эффект от предлагаемых изменений в рабочий процесс зависит от снижения доз облучения при нормальной или аварийной работе, другими словами: чем меньше требуется затрат для уменьшения дозы облучения, тем более экономически выгоден процесс.

В технологическом плане это означает снижение дозы облучения за счёт уменьшения нахождения в поверхностных резервуарах, трубопроводах и т.д. радиоактивных веществ: чем быстрее будет произведён цикл первичной обработки и раствор будет закачан на глубину захоронения, тем меньше затрат требуется для обеспечения радиационной безопасности на территории.

Представить экономический эффект в виде аналитической формулы невозможно, поскольку имеется слишком много факторов, определяемых конкретикой работы, и, хотя можно уверенно утверждать об экономической выгоде предлагаемых изменений, конкретные значения могут быть получены лишь эмпирическим путём уже после практического осуществления предлагаемых изменений и проверке их эффективности на практике.

Например, сепарированный сбор жидких отходов даёт возможность сократить накопление осадков в приёмных емкостях, но насколько именно уменьшится объём осадка, насколько конкретно дешевле будет его обработка и т.д. – возможно выяснить лишь на практике, собрав статистику за некий срок.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что технология изоляции ЖРО в глубинных пластах-коллекторах имеет как экологические, так и экономические преимущества по сравнению с другими способами утилизации РАО, однако рабочий процесс и по настоящее время нуждается в оптимизации, в частности в применении дополнительных ступеней очистки перед захоронением ЖРО, что даст положительный экологический и экономический эффект.

ГЛАВА 3 Предложение усовершенствованной технологии очистки

3.1 Совершенствование очистки от механических примесей

Для предложения усовершенствованного метода очистки рассмотрим кратко технологический процесс: одним из центробежных насосов В-90/2, В90/3, В-91/1, В-91/2, В-91/3 (работает один насос, другие в резерве) из емкостей В-81, В-83/1, В-83/2, В-84 объемом 2000 м^3 жидкие радиоактивные отходы подаются в мешалку В-273, где происходит добавление кислотного или щелочного раствора для нейтрализации, затем в промежуточные емкости В-253, В-270, из которых одним из высоконапорных насосов В-147/1, В-147/2, В147/3 (один в работе, другие в резерве) ЖРО закачиваются в нагнетательную скважину.

В IV водоносный комплекс производили закачку с максимально разрешенным лицензией расходом $22,5 \text{ м}^3/\text{час}$ и с показателем «мутность» до $10 \times 10^{-3} \text{ 1/см}$.

При мутности около $10 \times 10^{-3} \text{ 1/см}$ расход при закачке в III водоносный комплекс по сравнению с IV водоносным комплексом уменьшился почти в 2 раза, а давление в скважине увеличилось на 10 кг/см^2 .

Образование мутности связано с присутствием в дезактивирующих растворах, в обмывочных водах помещений и стирки спецодежды коллоидных частиц, которые коагулируют терригенные породы III проницаемой зоны, характеризующихся малыми размерами пор. В связи с этим, для дальнейшей устойчивой эксплуатации скважин III проницаемой зоны требуется обеспечивать мутность отходов, направляемых на захоронение, не более $6 \times 10^{-3} \text{ 1/см}$.

В настоящее время емкости откачиваются не полностью, в них остается от 10 до 30% объема. При откачке ниже этого уровня мутность ЖРО, поступающих на захоронение, превысит разрешенные $6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/см}$.

Увеличение мутности ЖРО ведет к снижению приемистости нагнетательной скважины, т.к. кольтатация горных пород ведет к снижению расхода и давления нагнетания. Приемистость характеризуется коэффициентом, равным отношению количества рабочего агента, закачиваемого в пласт в единицу времени, к репрессии, создаваемой на забое скважины при закачке [39]:

$$K = \frac{Q}{\Delta P} = \frac{Q}{P_{\text{заб}} - P_{\text{пл}}} \quad (3.1)$$

где Q – расход, закачиваемый в скважину; $P_{\text{заб}}$ – забойное давление, МПа; $P_{\text{пл}}$ – пластовое давление, МПа.

При закачке ЖРО в III поглощающий горизонт с учетом глубины скважины и плотности пластовой жидкости формула (1) принимает вид:

$$K = \frac{10 \times Q_{\text{ч}}}{P - 18.07} \quad (3.2)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – расход, м³/ч; P – в лифтовой колонне скважины, МПа.

Закачка ЖРО производилась в периоды с 19.06.2015 по 30.06.2015 и с 08.07.2015 по 14.07.2015. Результаты измерений параметров представлены в таблице 4. Зависимость коэффициента приемистости от значения мутности представлена на графике (рисунок 8).

Таблица 4 –Параметры при захоронении ЖРО

Дата	Q м ³ /час	pH	коэффициент приемистости	M см ⁻¹
1	2	3	4	5
17.06.2015	10,5	7	16,5	4,9
18.06.2015	10,5	6,6	8,9	3,2
19.06.2015	11	6,5	9,1	3,4
20.06.2015	10,5	6,5	9,3	5,3
21.06.2015	9,6	6,5	9	4,1
22.06.2015	7,5	6,5	7,7	2,4
23.06.2015	9	6,5	6,3	4,4
24.06.2015	8,5	6,5	7,4	2,4
25.06.2015	6,8	6,5	5,8	2,6

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
26.06.2015	6,8	6,5	5	4,8
27.06.2015	6,8	7,3	4,7	3,9
28.06.2015	6,5	7,2	4,6	5,3
29.06.2015	-	-	-	-
30.06.2015	-	-	-	-
01.07.2015	-	-	-	-
02.07.2015	-	-	-	-
03.07.2015	-	-	-	-
04.07.2015	-	-	-	-
05.07.2015	-	-	-	-
06.07.2015	12,8	6,6	12,2	3,8
07.07.2015	13,2	7	10,8	3,2
08.07.2015	12,3	7,1	9,8	3,7
09.07.2015	12,5	6,5	10	5,2
10.07.2015	12,7	6,5	10,7	5,6
11.07.2015	12,7	6,5	5	11
12.07.2015	15	7,4	10,8	3,3

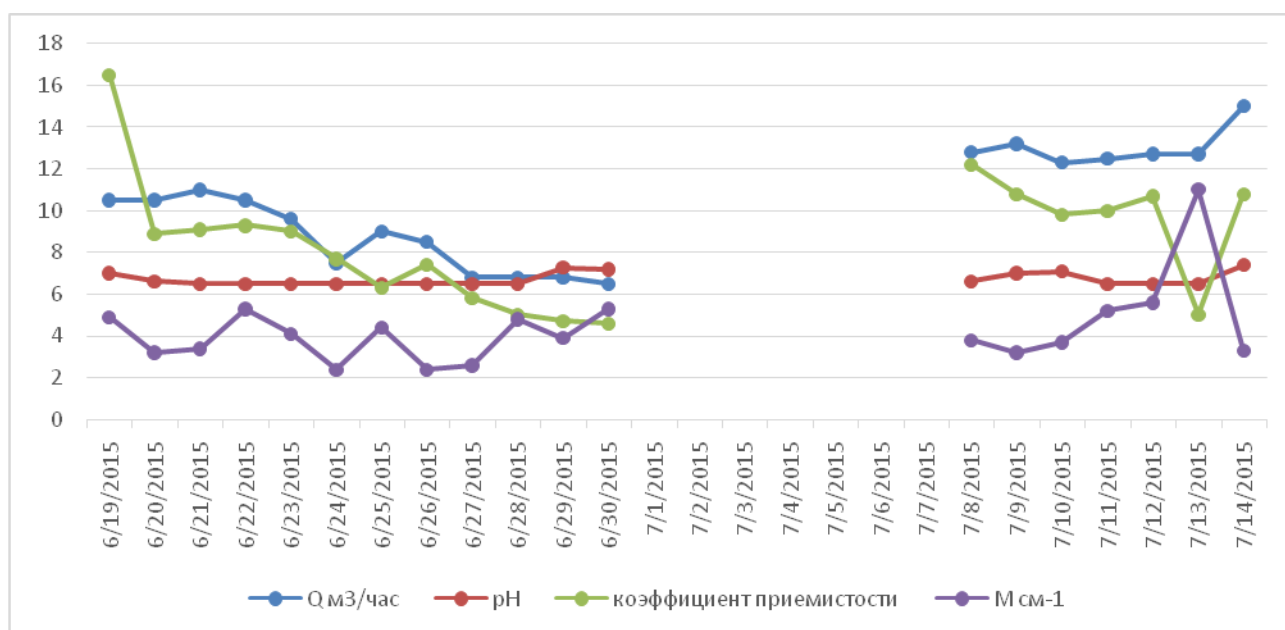


Рисунок 8 – График параметров при закачке ЖРО

В работе ставится задача: предусмотреть очистку ЖРО от механических примесей перед глубинным захоронением для снижения мутности с целью продления дальнейшей эксплуатации пункта глубинного захоронения.

По условиям технологического процесса целесообразно применить напорный фильтр. Для обеспечения необходимого рабочего давления фильтр предполагается установить перед емкостью В-273 (рисунок 9). Напорные фильтры имеют высокую производительность и небольшие габаритные размеры.

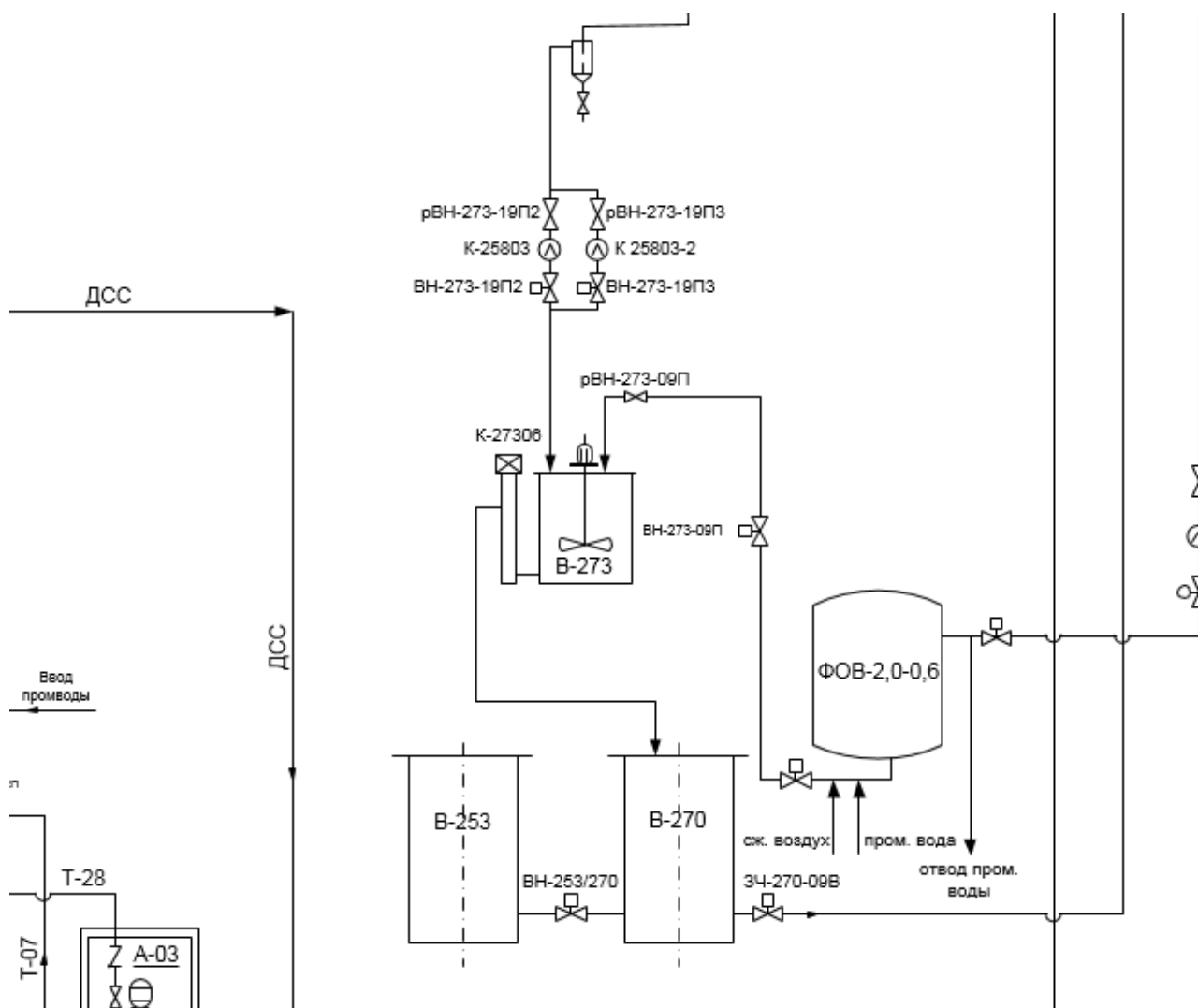


Рисунок 9 – Место установки фильтра насыпного

Для выбора фильтра производится расчет. Необходимая площадь фильтрования фильтра:

$$F = \frac{Q_n}{W} \quad (3.3)$$

где $Q_n = 22,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ – разрешенный расход при закачке ЖРО,

$W = 10 \text{ м/ч}$ – скорость фильтрования в фильтре, загруженном кварцевым песком (диаметр зерен 0,5-1,2 мм), при нормальной работе.

$$F = \frac{22,5}{10} = 2,25 \text{ м}^2.$$

Выбираем фильтр ФОВ-2,0-0,6, площадью фильтрования $3,14 \text{ м}^2$ и высотой слоя загрузки 1 м.

Расход воды на взрыхление фильтра:

$$q_{\text{взр}} = \frac{\pi \cdot i \cdot t_{\text{взр}} \cdot 60}{1000} \quad (3.4)$$

где $i = 15 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ – интенсивность взрыхления фильтра, загруженного кварцевым песком,

$t_{\text{взр}} = 6 \text{ мин}$ – продолжительность взрыхляющей промывки.

$$q_{\text{взр}} = \frac{3,14 \cdot 15 \cdot 6 \cdot 60}{1000} = 17 \text{ м}^3,$$

Расход воды на отмывку фильтра:

$$q_{\text{отм}} = \frac{\pi \cdot W_{\text{отм}} \cdot t_{\text{отм}}}{60} \quad (3.5)$$

где $W_{\text{отм}} = 4 \text{ м/ч}$ – скорость спуска в дренаж первого мутного фильтрата,

$t_{\text{отм}} = 10 \text{ мин}$ – продолжительность отмывки.

$$q_{\text{отм}} = \frac{3,14 \cdot 4 \cdot 10}{60} = 2,1 \text{ м}^3.$$

Часовой расход воды на собственные нужды фильтра:

$$q_{\text{ч}} = \frac{(q_{\text{взр}} + q_{\text{отм}}) \cdot m}{24} \quad (3.6)$$

где m – число отмывок фильтра в сутки.

$$q_{\text{ч}} = \frac{(17 + 2,1) \cdot 2}{24} = 1,6 \text{ м}^3/\text{ч},$$

Количество воды, поступающей на фильтры, с учетом расхода на собственные нужды:

$$Q_{\text{бр}} = Q_{\text{н}} + q_{\text{ч}} \quad (3.7)$$

$$Q_{\text{бр}} = 22,5 + 1,6 = 24,1 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

Действительная скорость фильтрования:

$$W_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{бр}}}{n_{\phi} \cdot f} \quad (3.8)$$

где $f = 3,14 \text{ м}^2$ – площадь фильтрования.

$$W_{\text{д}} = \frac{24,1}{1 \cdot 3,14} = 7,7 \text{ м/ч}.$$

Время промывки фильтра:

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{взр}} + t_{\text{отм}} \quad (3.9)$$

$$t_{\text{пр}} = 6 + 10 = 16 \text{ мин}.$$

Продолжительность полезной работы фильтра между промывками:

$$T = \frac{1000 \cdot \Gamma \cdot f \cdot h \cdot n}{G_{\text{в}} \cdot Q_{\text{бр}}} - \frac{t_{\text{пр}}}{60} \quad (3.10)$$

где $\Gamma = 1 \text{ кг/м}^3$ – удельная грязеемкость фильтрующего материала,

$G_{\text{в}} = 10 \text{ г/м}^3$ – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на механические фильтры после осветлителя.

$$T = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 1}{10 \cdot 24,1} - \frac{16}{60} = 13 \text{ час}.$$

Суточное число отмывок каждого фильтра:

$$m = \frac{24}{T + t} \quad (3.11)$$

где $t = 0,5 \text{ ч}$ – продолжительность операций, связанных с промывкой фильтров.

$$m = \frac{24}{13 + 0,5} = 1,8.$$

Проанализировав технические условия и учитывая выполненные расчеты, предлагается применить насыпной песчаный фильтр ФОВ 2,0-0,6 (рисунок 10). Фильтры такого типа широко применяются в водоподготовке для осветления

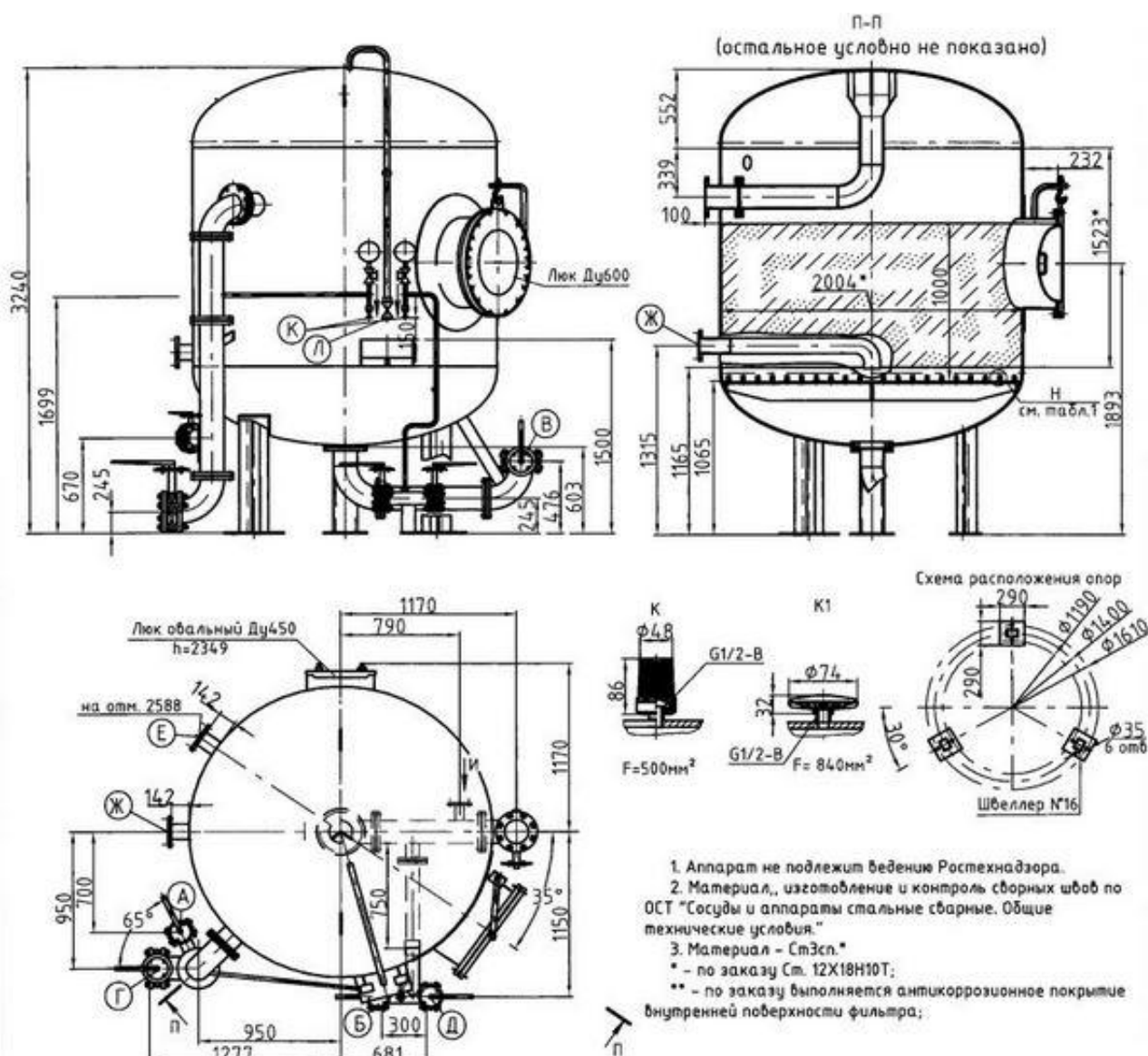


Рисунок 10 - Фильтр ФОВ-2,0-0,6

воды и очистки сточных вод, они надежны и просты в эксплуатации.

Характеристики фильтра представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики фильтра ФОВ-2,0-0,6

Характеристика	Значение
1	2
Диаметр	2000 мм
Высота	3240 мм
Объем фильтрующей загрузки	4,3 м³
Масса без загрузки	1960 кг
Температура рабочей среды, не более	40°C

Продолжение таблицы 5

1	2
Производительность	30 м ³ /час
Давление рабочее	0,6 МПа
Фильтрующий материал	кварцевый песок с крупностью зерен 0,7 – 1,6 мм.
Высота загрузки	1000 мм

В настоящее время контроль мутности и других параметров производится периодически методом ручного отбора проб и проведения лабораторных измерений. Поэтому возникает вероятность захоронения ЖРО с превышением установленных критериев приемлемости из-за отсутствия непрерывного контроля.

С целью постоянного контроля мутности целесообразно на линии подачи ЖРО перед фильтром насыпным установить прибор контроля мутности. По характеристикам и монтажным размерам наиболее соответствует мутномер ИКО-17. Пред установкой датчика в трубопровод вваривается шаровой кран. Затем устанавливается датчик прибора ИКО-17. В комплект мутномера входит съемник для установки и демонтажа датчика из трубопровода, находящегося под давлением до 1 МПа без остановки технологического процесса (рисунок 11).

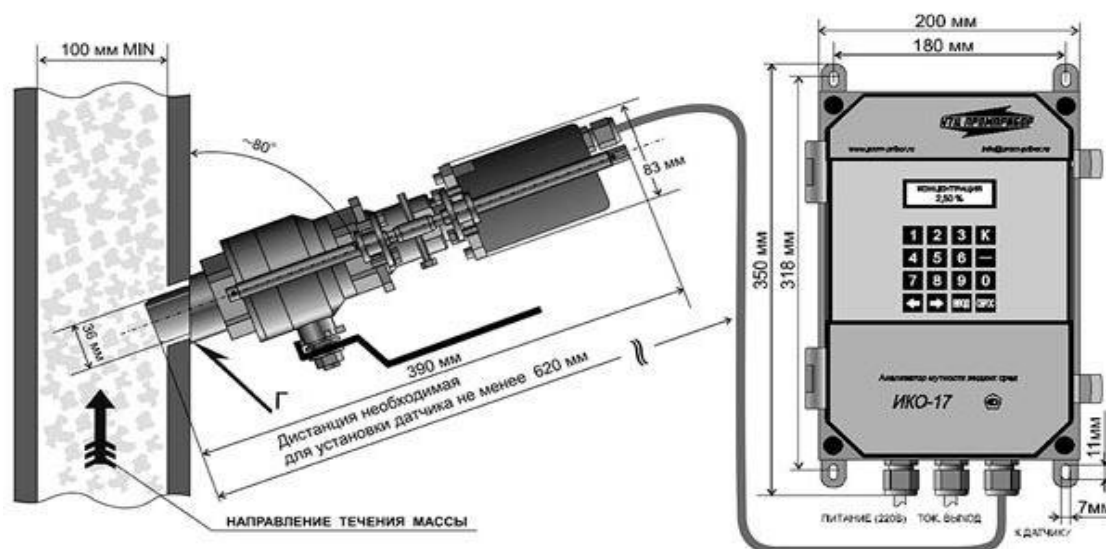


Рисунок 11 – Габаритные и присоединительные размеры мутномера ИКО-17

Характеристики мутномера ИКО-17 представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики мутномера ИКО-17

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений по шкале формазиновой суспензии	100 - 4000 ЕМФ
Диапазон измерений с зеркальной насадкой по шкале формазиновой суспензии	0 - 200 ЕМФ
Максимальная абсолютная погрешность измерения	± 4 ЕМФ
Максимальная абсолютная погрешность измерения	$\pm 0,05$ %
Вывод информации: - цифровой дисплей - токовый выход	4-20 mA (0-20 mA; 0-5 mA)
Габаритные размеры: - оптического датчика - оптического датчика с зеркальной насадкой - измерительного блока - шарового крана - длина соединительного кабеля	100 x 83 x 390 мм 100 x 83 x 430 мм 350 x 240 x 140 мм 310 x 140 x 100 мм 10 м
Масса, не более: - оптического датчика - измерительного блока - шарового крана	3 кг 2,5 кг 4,3 кг
Степень защиты измерительного блока	IP-67
Допустимые параметры окружающей среды: - влажность - температура	до 95% при 20°C +5 ... +50°C
Питание	220 В, 50 Гц

Во время процесса закачки ЖРО оперативный персонал постоянно находится в помещении щита управления. Поэтому показание мутномера необходимо вывести на щит управления установкой для непрерывного контроля персоналом. В связи с тем, что значения мутности достигают допустимого уровня только при откачивании ЖРО с нижней части емкостей, предлагается включать фильтр в работу в периодическом режиме по показанию мутномера.

3.1.1 Исследование работы фильтра насыпного при очистке ЖРО

Исследования проводились на напорном фильтре, который установлен для очистки ЖРО бассейнов выдержки хранилища ОЯТ. ЖРО бассейнов

выдержки и ЖРО, поступающие на глубинное захоронение, имеют аналогичный радионуклидный состав и характеристики.

За время эксперимента через фильтр было пропущено 2980 м³ бассейновой воды. Во время работы фильтра производили отбор проб для определения величины рН, концентрации железа и объемной активности исходной воды и фильтрата. Результаты этих измерений представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Показатели работы кварцевого фильтра

Объем пропущенной воды, м ³ /час	Активность, Ки/кг		Содержание железа, мг/кг	
	Исходная	Фильтрата	Исходная	Фильтрата
30	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1,15	0,09
120	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1,20	0,09
180	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	1,13	0,10
210	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	1,06	0,02
285	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-7}$	1,26	0,06
330	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$	1,42	0,03
420	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	1,30	0,05
465	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-7}$	1,23	0,02
540	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	1,18	0,02
705	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	1,95	0,05
870	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	1,06	0,02
1035	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	1,30	0,02
1365	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,20	0,02
2120	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,09	0,02
2330	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	1,05	0,02
2840	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,12	0,05
2975	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,12	0,05

Средняя концентрация железа в исходной воде, поступающей на очистку, составляла 1,3 мг/л, а в фильтрате - на уровне предела обнаружения применяемой методики (0,04 мг/л). Таким образом, коэффициент очистки от

железа составил около 30 и на фильтрующем слое за время опытной эксплуатации фильтра было задержано примерно 3800 г шламов продуктов коррозии (в пересчете на железо).

Эффект очистки воды от радионуклидов наблюдали в начальный период работы фильтра (рисунок 12), но после пропускания $\sim 1500 \text{ м}^3$ воды объемная активность фильтрата увеличилась практически до исходной, что указывает на исчерпание сорбционной способности кварцевого песка.

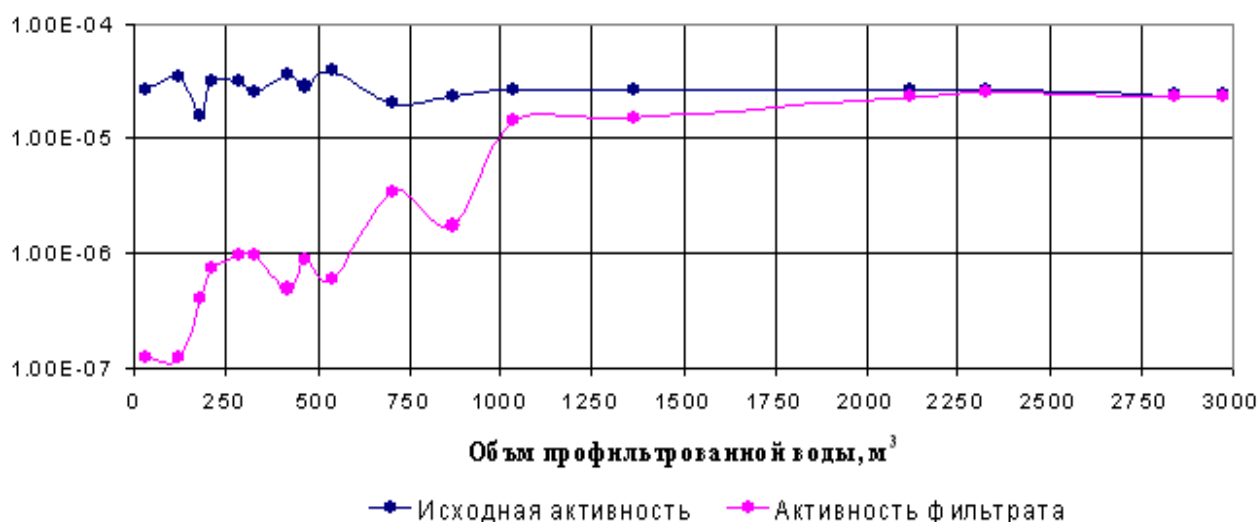


Рисунок 12 - Изменение активности фильтра при работе кварцевого фильтра

Проведенные испытания показали, что кварцевый фильтр достаточно эффективно очищает воду от шлама продуктов коррозии (коэффициент очистки ~ 30). По оценке персонала хранилища ОЯТ после очистки воды одного из бассейнов в течение примерно 100 часов был достигнут заметный эффект ее осветления.

Во время работы установки производили измерения гамма-фона на расстоянии 10 см от корпуса фильтра в точках, расположенных равномерно по высоте фильтра. Замеры гамма-фона производили перед проведением эксперимента, после пропускания 100 м^3 и в конце эксперимента после 790 м^3 . Результаты измерений приведены на картограмме (таблица 8).

Таблица 8 – Картограмма мощности дозы гамма-излучения по высоте фильтра

Н, мм	Мощность дозы γ -излучения, мкР/с		
	0 м ³	100 м ³	790 м ³
2400	1	6	10
1800	1	28	100
1200	1	300	700
600	1	110	300
0	2	3	20

Высота фильтрующего слоя в фильтре составляет порядка 1698 мм. Как видно по таблице 5 максимум мощности дозы гамма-излучения находится на уровне верхнего слоя песка. Нижний слой песка толщиной 600 мм. содержит радионуклидов существенно меньше, чем верхняя часть. После взрыхляющей промывки фильтра обратным потоком воды с расходом 100 м³/ч мощность дозы в точке максимума снизилась на 150 мкР/ч.

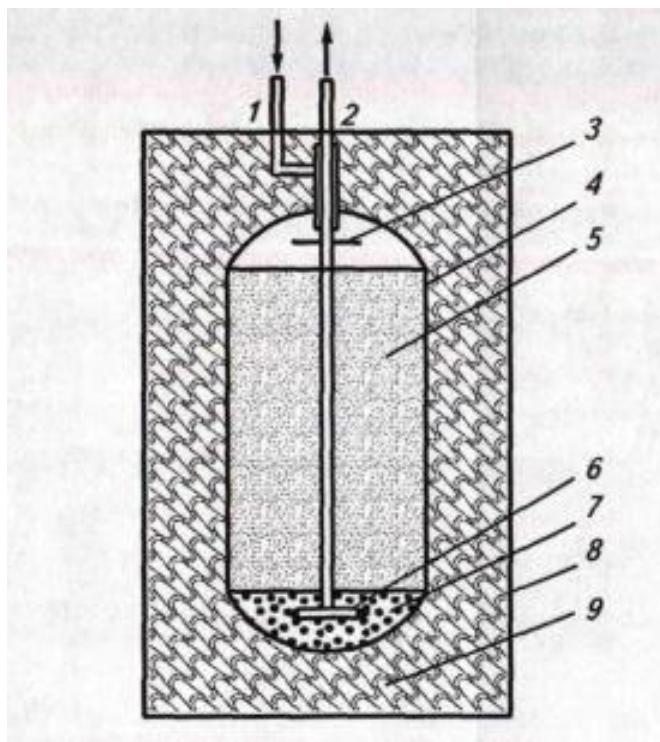
3.2 Совершенствование очистки от радионуклидов цезия-137

Как показали измерения активности ЖРО до и после прохождения фильтра, фильтр напорный не обеспечивает очистку от радионуклидов. Основным радионуклидом в ЖРО, поступающих на захоронение, является цезий-137 (таблица 3). Поэтому для очистки от радионуклидов цезия-137 предлагается после механической очистки на напорном фильтре ввести вторую ступень очистки от цезия.

Высокой селективностью к цезию обладают искусственные неорганические ферроцианидные сорбенты. Работы, проведенные в данной области показывают, что применение ферроцианидных сорбентов является наиболее перспективным [16, 40, 41]. Очистку от цезия возможно выполнять методом осаждения или селективной сорбции. Для рассматриваемого технологического процесса предлагается выбрать метод селективной сорбции.

Очистку на ферроцианидных сорбентах следует установить на линии после очистки на насыпном фильтре.

В работе [16] наибольшую эффективность работы показал фильтр-контейнер, разработанный на Московской станции переработки ЖРО (рисунок 13).



1 – патрубок ввода ЖРО, 2 – патрубок очищенных ЖРО, 3 – отбойник-распределитель раствора, 4 – корпус фильтра, 5 – селективный сорбент, 6 – дренажная система с колпачками, 7 – слой гравия, корпус контейнера, 9 – бетон

Рисунок 13 – Фильтр-контейнер

Фильтр-контейнер представляет собой неразборную конструкцию и после отработки ресурса подлежит захоронению. При использовании сорбента марки НЖС (ферроцианид никеля, нанесенный на силикагель) ожидаемый ресурс сорбента составит 10000 колоночных объемов и коэффициент очистки от цезия 10^4 [16]. Колоночный объем представляет отношение объема пропущенной жидкости к объему сорбента. Если применить фильтр аналогичной конструкции с объемом сорбента 2 м^3 и пропускать через него

ЖРО, которые требуют очистки (за год примерно 6000 м^3 – 10% от общего годового объема), тогда ресурс фильтра составит 3 года.

3.3 Определение оптимального режима работы фильтров

3.3.1 Анализ изменения параметров во время процесса захоронения

В ходе работ при захоронении ЖРО был проведен анализ зависимости основных параметров захораниваемых ЖРО от изменения уровней в емкостях. ЖРО поступали из емкостей В-81, В-83/2, В-84 объемом 2000 м^3 каждая. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Изменение параметров ЖРО при снижении уровня емкостей

Емкость	Уровень в емкости, %	Параметры	
		Мутность, см-1	Удельная активность, Бк/кг
1	2	3	4
В-81	80	2,3	3,00E+05
	70	2,3	2,20E+05
	60	2,6	3,20E+06
	50	2,5	2,60E+05
	40	2,8	3,20E+05
	30	3	3,60E+05
	20	3,2	3,40E+05
	10	3,5	3,70E+05
В-83/2	80	7,2	7,30E+05
	70	7	8,20E+05
	60	6,8	9,10E+05
	50	7,4	9,30E+05
	40	9,6	8,40E+05
	30	9,8	9,50E+05
	20	-	-
	10	-	-

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4
В-81	80	3,8	4,20E+05
	70	4,2	4,60E+05
	60	4,2	5,10E+05
	50	4,3	4,30E+05
	40	4,1	4,00E+05
	30	4,3	4,10E+05
	20	4,5	4,50E+05
	10	4,6	4,50E+05

Из таблицы видно, что наименьшие значения мутности и активности ЖРО наблюдаются в емкости В-81, в емкости В-84 незначительное повышение этих параметров. Такие значения мутности и активности в емкостях В-81, В-84 позволяют производить откачку из емкостей до уровня менее 10% без превышения установленных критериев приемлемости для радиоактивных отходов 5 класса. Критерии приемлемости были установлены на основании НП-093-14 [42], значения критериев представлены в таблицах 10, 11. Наиболее высокие значения мутности характерны для емкости В-83/2. При достижении уровня в 30 % значение мутности близко к предельному значению, что не позволяет производить дальнейшую закачку ЖРО из этой емкости. Это связано с тем, что только в эту емкость ведется прием отработанных растворов со спецпрачечной.

Таблица 10 – Химический состав, разрешенный к закачке

Компонент	Единица измерения	Содержание, не более
1	2	3
Жесткость общая	мг-экв/дм ³	150
Щелочность общая	мг-экв/дм ³	25

Продолжение таблицы 10

1	2	3
Натрий	г/дм ³	30
Железо общее	мг/дм ³	500
Продукты коррозии	мг/дм ³	500
Соли тяжелых металлов	мг/дм ³	500
Фосфаты /на Р/	мг/дм ³	150
Хлориды	мг/дм ³	150
Нитраты	г/дм ³	50
Сульфаты	мг/дм ³	300
Кремнекислота	мг/дм ³	50
Оксалаты	мг/дм ³	150
ПАВ	мг/дм ³	70
Жирные кислоты	мг/дм ³	20
Масла	мг/дм ³	250
Окисляемость	гО ₂ /дм ³	1
Сухой остаток	г/дм ³	100
Взвешенные вещества для 3 горизонта	мг/дм ³	6
для 4 горизонта	мг/дм ³	10
Величина рН		6,0-9,0
Плотность	т/м ³	1,1
Мутность для 3 горизонта	1/см	6·10 ⁻³
для 4 горизонта	1/см	10·10 ⁻³

Таблица 11 – Радионуклидный состав ЖРО, разрешенный к закачке в поглощающий комплекс

Радионуклид	Единица измерения	Удельная активность, не более
Сумма бета-излучающих нуклидов, за исключением трития (неразделенная смесь продуктов деления и активации, в основном цезий-137,134; стронций-89,90; европий-152,154; церий-141,144; цирконий-95, ниобий-95; рутений-103,106; йод-131; кобальт-60; барий-140, родий-103,106; марганец-54)	Бк/м ³	$3,7 \cdot 10^{10}$
Сумма альфа-излучающих нуклидов	Бк/м ³	$3,7 \cdot 10^7$
Тритий	Бк/м ³	10^{12}

Средний химический состав закачанных отходов представлен в таблице 12. Из таблицы видно, что по другим параметрам ЖРО соответствуют критериям приемлемости и не требуют дополнительной обработки.

Таблица 12 – Состав ЖРО, поступающих на захоронение

Компонент	Единица измерения	Содержание
1	2	3
Жесткость общая	мг-экв/дм ³	6,3
Щелочность общая	мг-экв/дм ³	5,9
Железо общее	мг/дм ³	0,6
Фосфаты /на Р/	мг/дм ³	5,6
Хлориды	мг/дм ³	62,6
Нитраты	г/дм ³	40,5
Сульфаты	мг/дм ³	163,4
Оксалаты	мг/дм ³	5,8
Окисляемость	мгО ₂ /л	114,1
Сухой остаток	мг/л	1215,7

Продолжение таблицы 12

1	2	3
Взвешенные вещества	мг/дм ³	до 5
Величина pH		6,0-9,0
Плотность	т/м ³	1,0032

Зависимость мутности от уровня емкостей представлена на рисунке 14. Удельная активность ЖРО в емкости В-82/2 также имеет значения больше, чем в других емкостях, но не превышает допустимого уровня. Очевидно, что значение удельной активности будет увеличиваться при откачке с уровня ниже 30%, и возможно превышение разрешенного уровня.

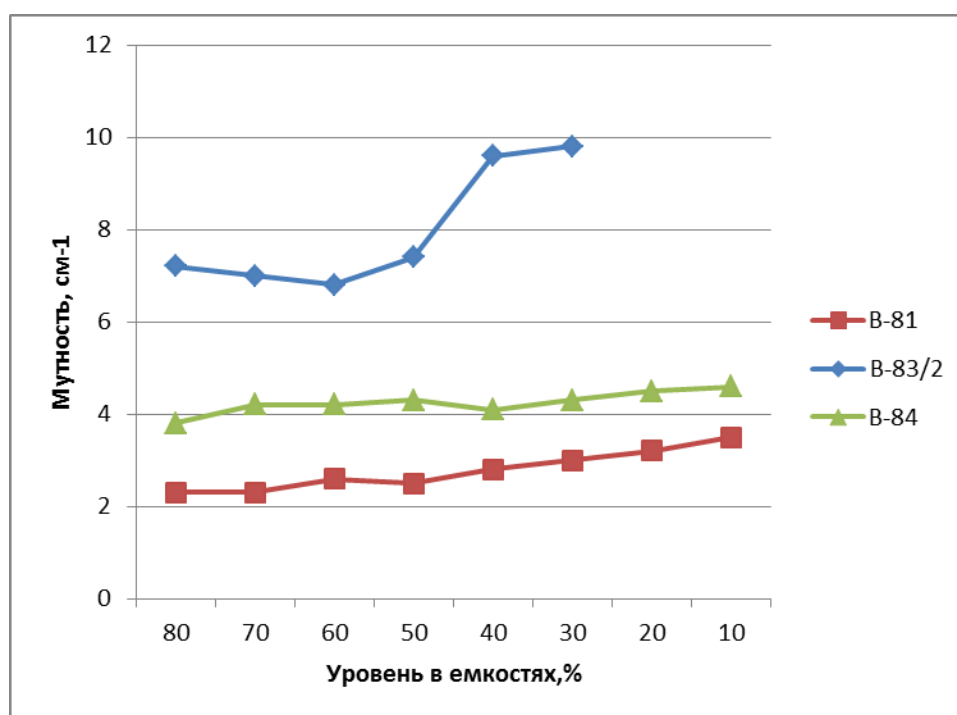


Рисунок 14 – Зависимость мутности ЖРО, поступающих на захоронение от уровня жидкости в емкости

3.3.2 Режимы работы фильтров

Учитывая результаты, изложенные в п.3.3.1, можно установить три режима работы.

Первый режим – захоронение ЖРО без дополнительной очистки. Такой режим возможен при захоронении из емкостей В-81, В-84, а также из емкости В-83/2 до уровня 30%

Второй режим – применение фильтра насыпного во время заправки ЖРО из емкости В-83/2 при повышенных значениях мутности. Мутность будет непрерывно контролироваться мутномером ИКО-17.

Третий режим – применение двухступенчатой очистки. Этот режим предполагает после очистки от примесей на насыпном фильтре очистку от радионуклидов цезия на фильтре с ферроцианидным сорбентом. Включение фильтра с ферроцианидом предполагается производить только при приближении значений удельной активности к допустимым.

Окончательный вариант технологической схемы представлен на рисунке 15.

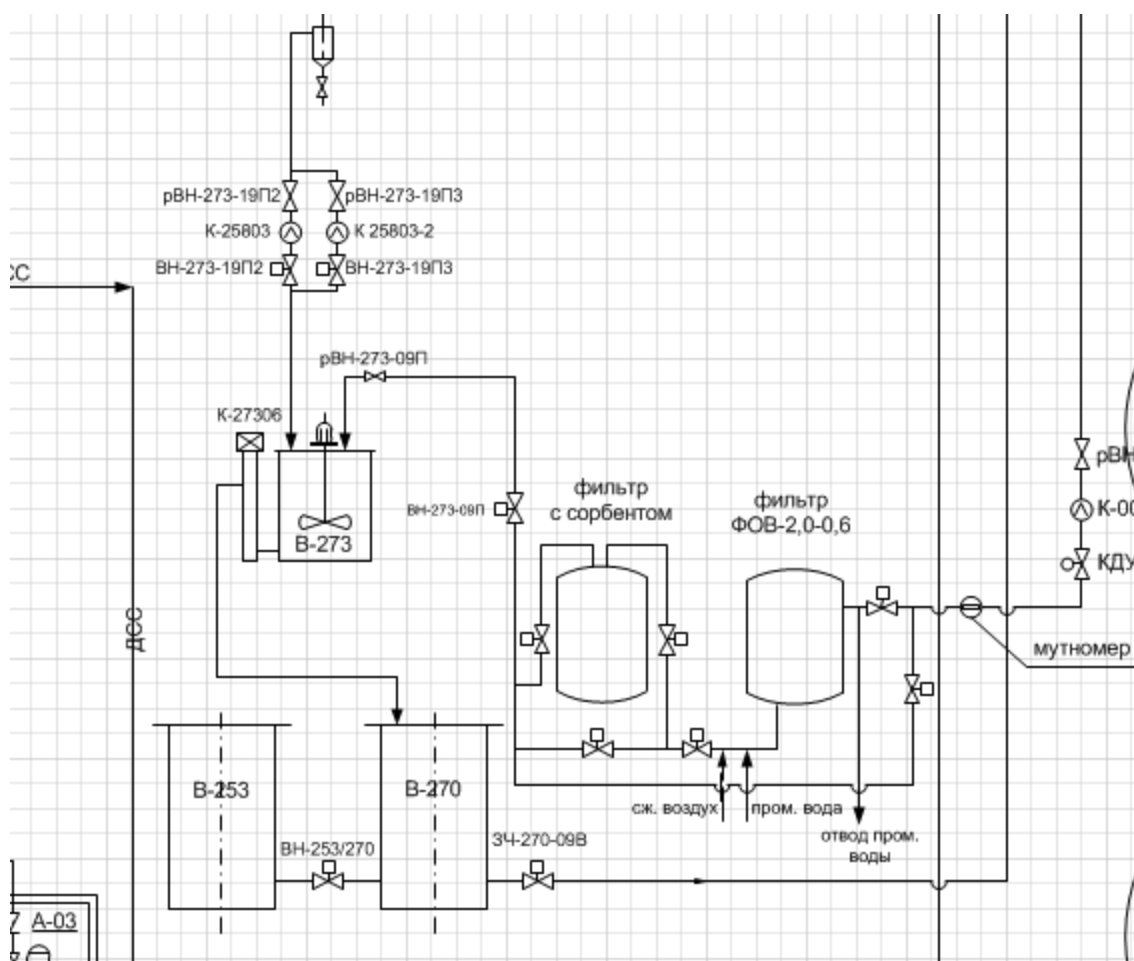


Рисунок 15 – Схема подключения фильтров

Использование разных режимом работы фильтров позволит значительно увеличить их ресурс, сократить количество потребляемых материалов. Также будет минимизировано образование вторичных радиоактивных отходов.

3.4 Определение экологического и экономического эффекта

3.4.1 Расчёт экономического эффекта

В случае внедрения усовершенствованной технологии очистки очевидно, что возникают дополнительные издержки на новое оборудование, возрастут затраты на эксплуатацию. Но дальнейшая эксплуатация не возможна без усовершенствования технологии. Другой возможный способ решения проблемы – извлечение осадка из емкостей, после чего может быть продолжена эксплуатация без внедрения дополнительных ступеней очистки ЖРО. Поэтому для определения экономического эффекта предлагается определить способ, который обойдется меньшими затратами для выполнения поставленной задачи.

В предлагаемом способе очистке применяется следующее дополнительное оборудование:

- фильтр ФОВ-2,0-0,6
- фильтр с ферроцианидным сорбентом,
- мутномер ИКО-17,
- запорная арматура,
- трубопровод.

В таблице 13 приведено оборудование для очистки ЖРО и его стоимость.

Таблица 13 – Количество и стоимость оборудования, работ для очистки ЖРО

Наименование	Количество, шт.	Стоимость за шт., тыс. руб.	Всего, тыс. руб.
1	2	3	4
Фильтр ФОВ-2,0-0,6	1	700	700

Продолжение таблицы 13

1	2	3	4
Фильтр с сорбентом	1	940	940
Мутномер ИКО-17	1	200	300
Запорная арматура	6	55	330
Трубопровод	25	2,5	62,5
Разработка проектной документации	-	-	1000
Монтажные работы	-	-	2500
Итого:			5832,5

Для решения задачи методом извлечения осадка из емкости с выполнении полного цикла работ потребуется следующее оборудование:

- установка размыва и извлечения нерастворимой части пульпы,
- установка кондиционирования образующихся вторичных радиоактивных отходов.

Расходы на осуществление данного метода представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Стоимость работ и оборудования для извлечения осадка из емкостей

Наименование работ	Стоимость, тыс. руб.
Разработка конструкторской документации, изготовление узлов и элементов установки для размыва и извлечения нерастворимой части пульпы	15000
Разработка, изготовление и монтаж установки кондиционирования образующихся вторичных радиоактивных отходов	27000
Итого:	42000

Из приведенных значений затрат видно, что стоимость извлечения осадка из емкостей примерно в 7 раз превысит предлагаемый способ очистки ЖРО при механической очистке и на фильтре с ферроцианидным сорбентом.

Также следует сравнить стоимость захоронения образующихся вторичных РАО, которая составляет значительную часть от общей стоимости.

Проектной документацией для ПГЗ ЖРО г. Димитровграда установлен срок эксплуатации до 2020 года. Учитывая периодический режим работы фильтров, ресурса применяемых в них материалов достаточно до конца проектного срока эксплуатации.

Тогда объем вторичных радиоактивных отходов при использовании фильтров составит:

- песок кварцевый – $4,3 \text{ м}^3$,
- фильтр-контейнер с сорбентом – 3 м^3 .

Объем вторичных отходов, если извлекать осадок только из емкости с наибольшим объемом осадка (В-83/2), составит 300 м^3 .

Тариф на захоронение 1 м^3 РАО 3 класса, к которому будут относиться вторичные отходы, на 2016 год составляет 132681,13 руб.

По предлагаемому способу стоимость захоронения составит 968572 руб., при извлечении осадка из емкости – 39804399 руб.

С экономической точки зрения значительно выгоднее производить дальнейшее глубинное захоронение с предварительной очисткой на насыпном фильтре и дополнительной очисткой от основных радионуклидов на ферроцианидном сорбенте.

3.4.2 Определение экологического эффекта

Определение экологического эффекта от внедрения усовершенствованной технологии осложнено тем, что воздействие радиоактивных отходов при данном методе захоронения происходит преимущественно на геологическую среду на глубине 1100-1450 м.

Воздействие захоронения жидких РАО на окружающую среду и население определяется процессами, протекающими в недрах, и состоянием инженерных сооружений: поверхностного комплекса приёма, подготовки и закачки отходов и подземных сооружений – скважин различного назначения. Как показывает практический опыт и прогнозирование последствий захоронения жидких РАО и нерадиоактивных промстоков различных отраслей промышленности, протекающие в недрах процессы – повышение пластового давления вследствие нагнетания отходов и изменение напряжённого состояния геологической среды, изменение состава подземных вод пласта - коллектора и буферного горизонта, изменения температуры пласта-коллектора практически не влияют на среду непосредственного обитания человека и животных, развитие растительности как в период осуществления захоронения, так и в течение длительного периода времени после закрытия полигона захоронения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе действующего процесса захоронении ЖРО было установлено, что основной проблемой является накопление осадка в приемных емкостях, и закачка ЖРО с повышенным содержанием взвешенных веществ приводит к их осаждению в горных породах проницаемой зоны и снижает ресурс нагнетательных скважин.

Разработана технологическая схема очистки ЖРО перед глубинным захоронением. Схема включает в себя предварительную очистку на напорном насыпном фильтре, что позволяет достичь коэффициента очистки от железа около 30.

Применение фильтра с ферроцианидным сорбентом позволит производить очистку от цезия с коэффициентом до 10^4 .

Выбранный способ очистки ЖРО позволяет производить дальнейшее применение глубинного захоронения с затратами в 7 раз меньше, чем при варианте извлечения осадка из емкостей. Стоимость захоронения вторичных радиоактивных отходов при этом в 40 раз ниже, чем при способе извлечения осадка из емкостей.

В дальнейшем могут быть продолжены исследования по выбору оптимального ферроцианидного сорбента и работы по усовершенствованию конструкции фильтра с сорбентом. Также следует рассмотреть возможность применения очистки ЖРО, поступающих от спецпрачечной, для предотвращения образования осадка в емкостях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // "Российская газета", N 210/1 (спец. выпуск), 17.09.2010; Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 N 43 "О внесении изменений в отдельные санитарные правила, устанавливающие требования в области радиационной безопасности" // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 25.11.2013.
2. Федеральный закон от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета", N 153, 15.07.2011; Федеральный закон от 02.07.2013 N 188-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" // "Российская газета", N 148, 10.07.2013.
3. Милютин В.В., Гелис В.М. Современные методы очистки жидких радиоактивных отходов и радиоактивно-загрязненных природных вод [Электронный ресурс] // М., 2011. URL: <http://www.ich.dvo.ru/~isse/2011/images/stories/papers/russian/milyutin.pdf> (дата обращения: 03.03.2015).
4. Серебряков Б.Е. О классификации радиоактивных отходов в России [Электронный ресурс] // Информационное агентство "ПРОАтом". СПб, 2011. - URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3180> (дата обращения: 04.03.2015).
5. Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide No. GSG-1, IAEA, Vienna (2009).
6. Локшин, Э.П. Сорбционная технология дезактивации жидких радиоактивных отходов с повышенным солесодержанием и перспективы её использования для реабилитации загрязнённых территорий //

- Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Матер. междунар. конф. Ч. 1. Апатиты: ИППЭС КНЦ РАН, 2004. - С. 148-150.
7. Бычков А.В., Зоран Д., Ожован М.И. Переработка и захоронение радиоактивных отходов: выбор технических решений [Электронный ресурс] // Российское атомное сообщество. М, 2007-2016. - URL: <http://www.atomic-energy.ru/technology/47543> (дата обращения: 04.03.2015) .
 8. Технологии обращения с РАО [Электронный ресурс] // ROSRAO.RU. URL: <http://www.rosrao.ru/wps/wcm/connect/rosrao/rosraosite> (дата обращения: 04.03.2015).
 9. Бекман И.Н. Радиохимия. Курс лекций. - М.: Издательство МГУ, 2006. - 568 с.
 10. Обращение с жидкими радиоактивными отходами посредством цементированья [Электронный ресурс] // Российское атомное сообщество. М, 2007-2016. - URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2009/01/23/1796> (дата обращения: 10.03.2015).
 11. Ожован М.И., Полуэктов П.П. Применение стекол при иммобилизации радиоактивных отходов [Электронный ресурс] // Российское атомное сообщество. М, 2007-2016. - URL: <http://www.atomic-energy.ru/technology/33037> (дата обращения: 10.03.2015).
 12. Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Матюнин Ю.И. Научные подходы и технические решения в области обращения с жидкими радиоактивными отходами // Российский химический журнал. 2005. Т. 49, № 4. - С. 29-41.
 13. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: пер. с англ. - М.: Мир, 1999. - 513 с.
 14. Пат. 2171509 Российская Федерация, МПК7 G21F 9/06, G21F 9/04. Способ термической переработки жидких радиоактивных отходов вымораживанием с получением очищенной воды и устройство для его осуществления [Текст] / Пашин В.М. [и др.]; заявитель и патентообладатель Центр. науч.-исслед. ин-т им. акад. А.Н. Крылова - № 99120605/06; заявл. 28.09.99; опубл. 27.07.01. - 2 с. : ил.

15. Старцев А.А. Инновационные технологии очистки // ЮНИДО в России. - 2010. - №1. - С. 58-62.
16. Ларионов С.Ю. Разработка технологии комплексной очистки жидких радиоактивных отходов [Текст]: дис. ...канд. техн. наук. - М., 2011. - 150 с.
17. Флоря С. Технология очистки ЖРО от трития для АЭС «Фукусима – 1». ФГУП «РосРАО». Красноярск, 2014. - 16 с.
18. "Атомпроект" создаст документы по проекту очистки вод АЭС "Фукусима-1" [Электронный ресурс] // РИА Новости. 16.02.2015. - URL: <http://ria.ru/atomtec/20150216/1048026178.html> (дата обращения: 12.03.2015).
19. Лифанов Ф.А., Карлина О.К. Опыт и перспективы развития технологий обращения с РАО на ГУП МосНПО «Радон» [Электронный ресурс] // Российское атомное сообщество. М, 2007-2016. URL: <http://www.atomic-energy.ru/technology/47937> (дата обращения: 12.03.2015).
20. Поляков В.И. Экологическая безопасность глубинной изоляции жидких радиоактивных отходов // Современные наукоемкие технологии. - 2005. - №9. - С.68-69.
21. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. - М.: Издат, 1994. - 257 С.
22. Миронов, В.П., Журавков В.В. Обращение с радиоактивными отходами. - Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. - 172 С.
23. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly / [United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation] URL: <http://www.unscear.org/docs/reports/gareport.pdf> (дата обращения: 04.08.2015).
24. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.08.2014 № 379 [Электронный ресурс] Режим доступа:

<http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=174914;fld=134;dst=100009;rnd=0.14974370725052089> (дата обращения: 10.08.2015)

25. Гупало В.С., Чистяков, В.Н. Использование экономико-математических моделей для решения задач захоронения радиоактивных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - №12. - С. 68-71.
26. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. и др. Развитие научных основ радиогеоэкологии подземных объектов долговременного хранения и захоронения ядерных и радиационно опасных материалов в геологических формациях европейского севера России // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2009. - №1. - С.45 - 51.
27. Комлева Е.В. Аспекты хранения и захоронения ядерных материалов // Юридическая наука. - 2012. - №1. - С.87 - 95.
28. Гурьянова О.Н. Захоронение радиоактивных отходов в различных геологических формациях // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - №1. - С.201 - 203.
29. Шутова Е.М. Краткий обзор новых патентов на оборудование для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива // Инженерный вестник Дона. - 2012. - №3. - С.531 - 535.
30. Дзюба С.Ф. Маркетинговое моделирование экономики пространственно-территориальных единиц. // Современные проблемы науки и образования (приложение «Экономические науки»). - 2014. - №6. - С. 4.
31. Горшкова Е.С., Алябьева Т.А., Корешкова А.Б. и др. Формирование организационной культуры в соответствии с целями организации // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2013. - №8 (часть 3). - С. 178 - 180.
32. Назаренко М.А. Основные направления процесса регионализации системы высшего образования как составляющей части социального партнерства в обществе // Сборник научных трудов SWorld - 2013. - Т. 19, - №. 3. - С. 88–93.

33. Назаренко М.А. Социальное партнерство — неотъемлемое условие эффективной управленческой деятельности вуза в малом городе (на примере г. Дубна Московской области) // Мир науки, культуры, образования - 2013. - № 5. - С. 55–58.
34. Иткис М.Г. Повышение квалификации инженерных кадров ОИЯИ на базе филиала МГТУ МИРЭА в г. Дубне [Электронный ресурс] / Иткис М.Г., Назаренко М.А. // Современные проблемы науки и образования. — Электрон. дан.- 2013. - № 5. - URL: www.science-education.ru/111-10624 (дата обращения: 15.09.2015).
35. Энергетика: цифры и факты. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1993. - 294 С.
36. Фишлок Д. Переработка отходов: решение еще не принято... - М.: ЦНИИАи, 1991. - 200 С.
37. О порядке государственного регулирования тарифов на захоронение радиоактивных отходов: постановление Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 1249 / [Кодексы и законы РФ] URL: <http://kzrf.ru/news-postanovlenie-pravitelstva-rf-n1249-2012-12-10.html> (дата обращения: 22.07.2015).
38. Миронов В.П., Журавков В.В. Обращение с радиоактивными отходами - Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. - 172 С.
39. Муфазалов Р.Ш. Исследование совместной работы пласта и нагнетательной скважины / Р.Ш. Муфазалов // Гидромеханика совместной работы пласта, добывающей и нагнетательной скважин: учеб. / Р. Муфазалов, Р. Муслимов, И. Бурцев. - Казань, 2000. - Гл.6. - С. 152 - 193.
40. Пат. 2399974 Российская Федерация, МПК6 G21F 9/12. Способ очистки от радионуклидов водной технологической среды атомных производств [Текст] / Шарыгин Р.М. [и др.]; патентообладатель ЗАО Произв.-науч. фирма «Термоксид» - № 2009119000/06; заявл. 19.05.09 ; опубл. 20.09.10, Бюл. № 26. - 8 с. : ил.
41. Пат. 2113025 Российская Федерация, МПК G21F 9/12. Способ очистки от радионуклидов цезия водных радиоактивных технологических сред

атомных производств [Текст] / Корчагин Ю.П. [и др.]; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т по экспл. атом. эл.-станций - № 96120302/25; заявл. 08.10.96 ; опубл. 10.06.98, Бюл. № 31. – 3 с.

42. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2014 № 572 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=177475&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.8289253327131522> (дата обращения: 11.05.2016).