

Автоматизированная система цифрового моделирования обращения с жидкими радиоактивными средами АЭС

Ю.А. Андриенко, Е.С. Анненкова, В.М. Жабицкий, М.Г. Жабицкий, О.В. Золотарева, Ю.Н. Конев, В.В. Коньков, П.А. Кузнецова, М.Ю. Кузов, А.А. Любарский, А.Е. Мазуров, Г.А. Повальнова, А.С. Серова, В.А. Сычев, К.В. Цыгулева

Аннотация—Разработка и внедрение технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) и жидкими радиоактивными средами (ЖРС) атомных электростанций относятся к числу наиболее сложных задач современной атомной энергетики. В работе представлена автоматизированная система научных исследований (АСНИ), предназначенная для цифрового моделирования, анализа и оптимизации производственно-технологических цепочек (ПТЦ) обращения с ЖРО и ЖРС. Система реализует онтологически ориентированный подход, обеспечивающий формализацию технологических потоков, переделов и их взаимосвязей в виде направленного графа преобразований. Разработана модульная архитектура, включающая средства управления данными, базу знаний технологий, модуль моделирования и инструменты анализа и поддержки принятия решений. В системе реализованы математические модели технологических процессов, применяемых в действующих комплексах переработки ЖРО АЭС с реакторами ВВЭР. Ключевым механизмом является цифровой эксперимент, позволяющий исследовать поведение ПТЦ при варьировании параметров входных потоков и структуры цепочки. Система прошла приемочные испытания и опытную эксплуатацию в 2025 году, зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ.

Ключевые слова—автоматизированная система, цифровое моделирование, производственно-технологическая цепочка, жидкие радиоактивные отходы, цифровой эксперимент, ВВЭР.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка и внедрение технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами и жидкими радиоактивными средами, образующимися при эксплуатации атомных электростанций, относятся к числу наиболее сложных и ответственных задач современной атомной энергетики. Эти технологии представляют собой многостадийные производственно-технологические цепочки, включающие совокупность взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в условиях значительной неопределенности параметров исходного сырья и жестких нормативных ограничений на характеристики конечного продукта. Ошибки на этапе проектирования таких систем приводят к существенным экономическим потерям, снижению эффективности переработки и потенциальным рискам для безопасности.

Традиционные подходы к разработке технологий обращения с ЖРО основаны на экспериментальной отработке решений с использованием лабораторных установок и опытно-промышленных стендов. Несмотря на их достоверность, данные методы характеризуются высокой стоимостью, длительными сроками и ограниченной возможностью исследования альтернативных технологических конфигураций. В условиях необходимости внедрения инновационных, нереперентных технологий такие ограничения становятся критическими и требуют перехода к новым инструментам инженерного анализа.

В последние годы одним из ключевых направлений развития инженерных методов является применение концепции цифровых двойников и цифрового моделирования сложных технологических систем. В работах [1]–[5] показано, что цифровые двойники позволяют моделировать поведение производственных систем на всех этапах их жизненного цикла, включая проектирование, эксплуатацию и оптимизацию. Современные исследования в области process systems engineering [6], [7] подчеркивают важность интеграции математических моделей, данных и алгоритмов оптимизации для повышения эффективности технологических процессов. Развитие подходов data-driven и интеллектуального производства [8], [9], а также применение гибридного и gray-box моделирования [10]–[14] демонстрируют возможности повышения точности и адаптивности цифровых моделей в условиях неопределенности.

Актуальность рассматриваемой проблематики подтверждается результатами современных исследований, выполняемых в интересах атомной отрасли. В частности, в работах [15]–[19] рассматриваются вопросы разработки и обоснования технологий переработки различных типов жидких радиоактивных отходов, включая отработавшие ионообменные смолы, кубовые остатки и жидкие радиоактивные среды сложного состава. Подходы к методологии моделирования технологических процессов обращения с жидкими радиоактивными средами представлены на уровне международных рекомендаций МАГАТЭ [20].

Предметной областью приложения методов и

инструментов моделирования комплексных технологических процессов является переработка жидких радиоактивных отходов АЭС ВВЭР. С 2023 года Росатом реализует комплексную программу НИОКР по разработке малоотходных технологий обращения с ЖРО и ЖРС АЭС ВВЭР [21]–[23]. Разработка, описанная в данной статье, выполнялась НИЯУ МИФИ в рамках реализации указанной программы.

В работе [24] предложена методология построения цифровых моделей производственно-технологических цепочек, основанная на формализации понятий технологического потока, технологического передела и технологического воздействия, а также представлении ПТЦ в виде направленного графа преобразований. Связанные подходы к построению цифровых двойников сложных инженерных объектов развиваются также в работах [25], [26].

Для технологических процессов, используемого оборудования и параметров комплексных технологических линий по обращению с ЖРО и ЖРС действуют установленные в Российской Федерации нормативные ограничения [27]–[30].

Вместе с тем, несмотря на развитость теоретических и методологических основ цифрового моделирования, в настоящее время наблюдается дефицит программных инструментов, обеспечивающих их комплексную реализацию в прикладных задачах проектирования технологий обращения с ЖРО.

В настоящей работе представлена автоматизированная система моделирования технологий обращения с жидкими радиоактивными средами и отходами (АСНИ), реализующая методологию цифрового моделирования производственно-технологических цепочек и обеспечивающая проведение виртуальных экспериментов для выбора и оптимизации технологических решений.

Целью работы является разработка и описание архитектуры, функциональных возможностей и принципов работы АСНИ как инструмента цифрового проектирования и оптимизации технологий обращения с ЖРО.

II. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПТЦ

A. Онтология предметной области

Моделирование технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами основывается на формализации производственно-технологических цепочек как совокупности взаимосвязанных преобразований материальных потоков. В рамках предложенного подхода [24] вводится онтология предметной области, включающая следующие ключевые сущности.

Технологический поток представляет собой совокупность материальных объектов (жидких, твердых и газообразных фаз), характеризуемых набором параметров, включающих расход, химический состав, радионуклидный состав, физико-химические свойства и показатели активности. Поток является базовой сущностью моделирования и служит носителем информации о состоянии системы.

Технологический передел определяется как элементарное преобразование технологического потока, реализующее изменение его параметров в результате физико-химического воздействия. Передел соответствует отдельной стадии технологического процесса (например, сорбция, фильтрация, выпаривание) и характеризуется набором входных и выходных потоков.

Технологическое воздействие описывает совокупность физических, химических и тепловых процессов, реализуемых в рамках передела и определяющих характер преобразования потоков.

Производственно-технологическая цепочка рассматривается как упорядоченная совокупность технологических переделов, связанных между собой потоками. ПТЦ определяет полную структуру технологии обращения с ЖРО и отражает последовательность преобразований от исходного сырья до конечного продукта.

B. Формальная модель ПТЦ

В рамках предложенной методологии [24] производственно-технологическая цепочка формализуется с использованием аппарата математического моделирования и теории графов. Технологический поток представляется в виде вектора параметров:

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

где компоненты вектора описывают физико-химические и радиологические характеристики потока, включая концентрации компонентов, активность радионуклидов, температуру, давление и другие параметры.

Технологический передел рассматривается как оператор преобразования:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}, \mathbf{p}),$$

где \mathbf{x} — входной поток, \mathbf{y} — выходной поток, \mathbf{p} — набор параметров процесса (режимные параметры, характеристики оборудования, коэффициенты модели), а F — оператор, описывающий физико-химические процессы преобразования.

Производственно-технологическая цепочка представляется в виде ориентированного графа:

$$G = (V, E),$$

где множество вершин V соответствует технологическим переделам, а множество дуг E — технологическим потокам, связывающим переделы между собой. Такая форма представления позволяет учитывать разветвленные структуры, рециркуляцию потоков и альтернативные технологические маршруты.

Представленная формализация обеспечивает универсальность описания ПТЦ и создает основу для реализации алгоритмов расчета, анализа и оптимизации технологических схем в программных системах.

C. Классы моделей и уровни моделирования

В зависимости от целей исследования и уровня детализации в рамках ПТЦ могут использоваться различные классы моделей [6–7].

Балансовые модели обеспечивают расчет материальных и радионуклидных балансов и применяются для оценки распределения потоков и степени очистки. Данный класс моделей является базовым и используется для предварительного анализа технологических схем.

Динамические модели учитывают временную эволюцию параметров системы и позволяют анализировать переходные процессы, устойчивость режимов и влияние изменения входных условий.

Сценарные модели ориентированы на исследование альтернативных конфигураций ПТЦ и позволяют сравнивать различные технологические решения при варьировании структуры цепочки.

Вариационные модели используются для анализа чувствительности и оптимизации параметров процессов, включая выбор режимов работы оборудования и состава технологических переделов.

Указанная классификация отражает уровни моделирования, реализуемые в рамках цифрового анализа ПТЦ, и служит основой для построения расчетных модулей автоматизированных систем моделирования.

D. Критерии эффективности и ограничения

Ключевым элементом моделирования производственно-технологических цепочек является оценка их эффективности с использованием совокупности критериев, отражающих технологические, экономические и нормативные требования.

Одним из основных показателей является коэффициент уменьшения объема отходов (КУО), характеризующий степень концентрирования радиоактивных веществ и снижение объема конечных отходов. Данный показатель широко используется при анализе технологий обращения с ЖРО и является одним из ключевых критериев выбора технологических решений [16-17].

Дополнительно учитываются следующие показатели:

- радиационные характеристики, включая удельную активность конечных продуктов;
- материальные потоки, определяющие объемы вторичных отходов;
- энергетические затраты, связанные с реализацией технологических процессов;
- технологические ограничения, включая допустимые диапазоны параметров и требования нормативной документации.

Как показывают результаты отраслевых исследований [15-19], эффективность технологий обращения с ЖРО существенно зависит от сочетания указанных факторов, а их оптимизация требует комплексного анализа ПТЦ с учетом взаимосвязи отдельных переделов.

Таким образом, формирование системы критериев эффективности и ограничений является необходимым условием для проведения корректного сравнительного анализа технологических схем и выбора оптимальных решений.

III. КОНЦЕПЦИЯ И АРХИТЕКТУРА АСНИ

A. Назначение системы

Автоматизированная система моделирования технологий обращения с жидкими радиоактивными средами и отходами (АСНИ) предназначена для цифровой поддержки процессов разработки, анализа и выбора технологических решений в области обращения с ЖРО и ЖРС на объектах атомной энергетики.

Система ориентирована на решение следующих ключевых задач:

- цифровое проектирование ПТЦ — формирование и исследование вариантов построения процессных технологических цепочек на основе структурированного описания потоков и переделов;
- снижение технологических и проектных рисков — за счёт предварительного моделирования и анализа различных конфигураций технологических решений;
- поддержка принятия решений — обеспечение специалистов инструментами для сравнения альтернативных технологий по критериям эффективности, безопасности и минимизации образования РАО.

АСНИ обеспечивает интеграцию экспериментальных данных, эксплуатационного опыта и теоретических моделей в единую цифровую среду, что позволяет перейти от фрагментарного анализа к системному моделированию технологических процессов. В частности, система используется для обоснованного выбора технологических решений в интересах предприятий атомной отрасли, включая задачи, актуальные для АО «Концерн Росэнергоатом».

B. Общая архитектура системы

АСНИ реализована как модульная информационно-вычислительная система, обеспечивающая полный цикл работы с технологическими моделями — от ввода исходных данных до анализа результатов моделирования.

В архитектуре системы выделяются следующие ключевые функциональные модули:

1. Модуль формирования исходных данных
Обеспечивает:

- о создание и настройку шаблонов потоков;
- о ввод экспериментальных и эксплуатационных данных;
- о формирование параметрических описаний потоков.

2. Модуль базы знаний

Реализует:

- о хранение описаний технологий, переделов и физико-химических процессов;
- о ведение структурированных и монолитных описаний;
- о работу с метками и классификацией данных.

3. Модуль моделирования

Включает:

- о построение моделей переделов;
- о формирование ПТЦ как совокупности взаимосвязанных переделов;
- о задание математических зависимостей (операторов преобразования).

4. Модуль анализа и интерпретации результатов

Обеспечивает:

- о проведение расчетов;
- о формирование отчетов;
- о сравнение вариантов технологических решений.

5. Модуль администрирования

Реализует:

- о управление пользователями и правами доступа;
- о контроль и логирование действий;
- о настройку системы.

Таким образом, архитектура АСНИ соответствует принципам цифровых платформ моделирования,

обеспечивая сквозную обработку данных и поддержку жизненного цикла технологических решений.

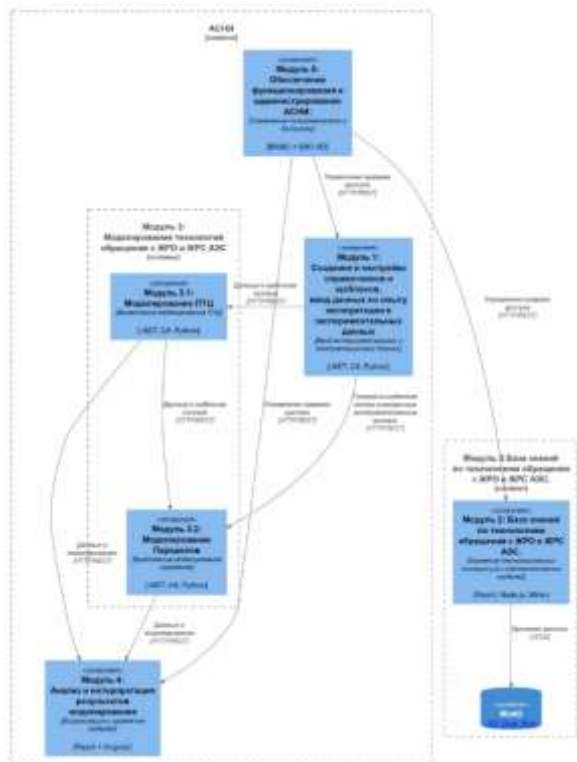


Рис.1 Архитектура системы

Дополнительно следует отметить, что программная реализация системы базируется на многослойной архитектуре (контроллеры, модели, репозитории, представления), что обеспечивает разделение логики обработки данных, хранения и пользовательского интерфейса.

С. Информационная модель системы

Информационная модель АСНИ является ключевым элементом системы и определяет способ формализации технологических процессов.

В основе модели лежат следующие соответствия:

Поток → структура данных

Поток в системе представляет собой структурированный набор характеристик, включающий:

- физико-химические параметры;
- технологические показатели;
- идентификаторы (в том числе KKS-коды);
- ограничения и зависимости.

Каждая характеристика описывается набором атрибутов (значение, единицы измерения, диапазоны, зависимости), что позволяет использовать поток как носитель данных в моделировании.

Передел → программный объект

Передел реализуется как объект, включающий:

- входные и выходные потоки;
- параметры процесса;
- математическую модель преобразования (оператор).

Математическое описание передела задается в виде формализованных выражений (например, на языке JavaScript), связывающих входные и выходные параметры:

$$Y_{out} = f(X_{in}, K)$$

где K — параметры передела.

Такой подход обеспечивает гибкость описания технологических операций и возможность их повторного использования.

ПТЦ → графовая модель

Процессная технологическая цепочка представляется в виде ориентированного графа, в котором:

- вершины соответствуют переделам;
- ребра соответствуют потокам;
- направления ребер отражают направление движения вещества и информации.

Данная модель позволяет:

- формировать сложные технологические схемы;
- выполнять расчет параметров по всей цепочке;
- анализировать влияние отдельных переделов на итоговый результат.

Таким образом, информационная модель АСНИ реализует переход от текстового описания технологий к формализованной вычислительной модели.

Д. Интеграция с жизненным циклом технологий

АСНИ поддерживает все основные этапы жизненного цикла технологических решений:

1. Лабораторные исследования

- ввод экспериментальных данных;
- формирование базовых моделей процессов;
- накопление знаний о физико-химических явлениях.

2. Проектирование

- построение и оптимизация ПТЦ;
- сравнение альтернативных технологических решений;
- оценка эффективности и параметров процессов.

3. Эксплуатация

- использование накопленных данных по опыту эксплуатации;
- актуализация моделей;
- поддержка принятия решений при модернизации технологий.

Интеграция данных этапов в рамках единой системы обеспечивает непрерывность информационного сопровождения технологий и соответствует современным подходам цифровых двойников технологических процессов.

IV. РЕАЛИЗОВАННЫЕ ФУНКЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (АСНИ)

Разработанная автоматизированная система научных исследований (АСНИ) реализует комплекс функциональных возможностей, обеспечивающих полный цикл работы с моделями технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) и жидкими радиоактивными средами (ЖРС) — от формирования исходных данных до анализа результатов и поддержки принятия решений.

Функциональная реализация системы основана на модульном принципе и включает взаимосвязанные компоненты, обеспечивающие работу с данными, моделями, знаниями и результатами расчетов.

А. Управление данными и шаблонами

Система обеспечивает централизованное управление исходными данными, используемыми при моделировании технологических процессов.

Реализованы следующие функции:

- формирование и ведение справочников параметров и характеристик, используемых при описании потоков и переделов;
- создание и настройка шаблонов технологических потоков, включая состав, физико-химические и радиационные характеристики;
- ввод и хранение экспериментальных и эксплуатационных данных, полученных в лабораторных и промышленных условиях;
- поддержка структурированного описания параметров с указанием единиц измерения, диапазонов допустимых значений и зависимостей;
- верификация корректности вводимых данных, включая контроль полноты и согласованности параметров.

Указанные функции обеспечивают формирование достоверной информационной базы для последующего моделирования и анализа технологических процессов.

В. База знаний технологий

АСНИ реализует функции накопления, структурирования и использования знаний о технологиях обращения с ЖРО и ЖРС.

В рамках системы формируется база знаний, включающая:

- паспорта технологических процессов и переделов, содержащие их описание, область применения и основные параметры;
- формализованные описания физико-химических процессов, лежащих в основе технологических воздействий;
- сведения о применяемом оборудовании и технологических режимах;
- нормативно-справочную информацию, используемую при анализе технологических решений.

База знаний обеспечивает:

- повторное использование моделей и описаний переделов;
- унификацию представления технологической информации;
- поддержку согласованности данных при моделировании различных ПТЦ.

Таким образом, реализуется переход от разрозненных данных к систематизированному представлению знаний о технологиях.

С. Моделирование технологических переделов и ПТЦ

В системе реализованы функции построения и расчета моделей технологических процессов различного уровня сложности.

К основным возможностям относятся:

- создание математических моделей технологических переделов на основе операторного представления;
- задание параметров процессов и условий их протекания;
- формирование ПТЦ как совокупности взаимосвязанных переделов;
- конфигурирование структуры технологических цепочек и их параметров.

Моделирование осуществляется на основе формализованного описания преобразования потоков,

что позволяет выполнять расчет параметров на всех этапах технологической цепочки.

Особенностью реализации является возможность:

- формирования альтернативных конфигураций ПТЦ;
- проведения вычислительных экспериментов без физической реализации технологий;
- повторного использования моделей переделов в различных технологических схемах.

Система обеспечивает выполнение балансовых расчетов, учет преобразования состава и активности потоков, а также моделирование поведения системы при изменении параметров.

Д. Анализ и интерпретация результатов моделирования

АСНИ реализует функции анализа результатов моделирования и их интерпретации для целей инженерного принятия решений.

К числу реализованных возможностей относятся:

- расчет ключевых показателей эффективности технологических цепочек, включая коэффициент уменьшения объема отходов, изменения активности и другие характеристики;
- формирование отчетов по результатам моделирования;
- сравнение альтернативных ПТЦ по заданным критериям;
- проведение сценарного анализа с варьированием параметров и структуры ПТЦ.

Система обеспечивает возможность оценки достижимости целевых параметров и выявления наиболее эффективных технологических решений.

Важной особенностью является поддержка анализа альтернатив, что позволяет рассматривать множество вариантов технологических схем и выбирать оптимальные решения на основе количественных критериев.

Е. Поддержка разработки технико-экономических обоснований

В рамках развития функционала АСНИ реализуются средства, обеспечивающие формирование и сопоставление технико-экономических показателей технологических решений.

Система позволяет:

- выполнять расчет технико-экономических показателей ПТЦ;
- формировать и сопоставлять варианты технологических схем с учетом затрат и эффективности;
- использовать результаты моделирования при подготовке технико-экономических обоснований.

Данный функционал ориентирован на практическое применение системы при обосновании выбора технологий обращения с ЖРО в рамках проектных и научно-исследовательских работ.

Ф. Обеспечение функционирования системы

АСНИ включает средства администрирования и управления доступом, обеспечивающие устойчивую и безопасную работу системы.

Реализованы:

- управление пользователями и ролями;
- разграничение прав доступа к данным и моделям;

- поддержка многопользовательского режима работы;
- ведение журналов действий пользователей.

В рамках развития системы предусмотрена реализация защищенного распределенного режима работы и интеграция с внешними информационными системами

V. НАПОЛНЕНИЕ СИСТЕМЫ ДАННЫМИ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ

Эффективность автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) определяется полнотой, достоверностью и структурированностью используемых данных, а также корректностью реализуемых математических моделей технологических процессов обращения с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) и жидкими радиоактивными средами (ЖРС).

В рамках разработки системы реализован комплексный подход, обеспечивающий переход от разрозненных экспериментальных, проектных и эксплуатационных данных к формализованным цифровым моделям технологических переделов и производственно-технологических цепочек (ПТЦ).

A. Источники и типы данных

Формирование информационной базы АСНИ осуществляется на основе интеграции данных различной природы, включая:

- экспериментальные данные лабораторных исследований технологических процессов переработки ЖРО и ЖРС;
- данные опытно-промышленных испытаний;
- эксплуатационные данные, полученные на действующих АЭС;
- проектные характеристики технологических систем;
- нормативно-справочную информацию;
- литературные и расчетные данные.

Особое значение имеют данные о составе и свойствах ЖРС, включая радионуклидный, химический и фазово-дисперсный состав, определяющие эффективность технологических процессов очистки и переработки.

B. Структурирование и верификация данных

В АСНИ реализован механизм формализованного представления данных, основанный на их привязке к объектам предметной области — потокам, переделам и ПТЦ.

Основные принципы организации данных включают:

- унификацию параметров технологических потоков;
- использование справочников характеристик и единиц измерения;
- структурирование данных по типам (радиационные, химические, гидродинамические параметры);
- обеспечение связности данных с моделями переделов;
- поддержку актуализации и версионности.

Верификация данных осуществляется путем:

- контроля полноты и непротиворечивости;
- проверки допустимости значений;
- согласования данных, полученных из различных источников.

Это обеспечивает формирование согласованной и пригодной для моделирования базы данных.

C. Разработка математических моделей технологических переделов

Моделирование технологических процессов в АСНИ основано на операторном подходе, при котором каждый передел рассматривается как преобразование входных потоков в выходные.

Модели переделов формируются с использованием:

- экспериментальных зависимостей;
- эмпирических и полуэмпирических соотношений;
- теоретических моделей физико-химических процессов;
- инженерных допущений.

Реализация моделей выполняется в виде вычислительных зависимостей, связывающих параметры входных и выходных потоков, включая:

- изменение объема;
- перераспределение активности;
- изменение радионуклидного состава;
- трансформацию фазового состояния.

Обеспечивается возможность задания моделей различной сложности и их повторного использования в составе различных ПТЦ.

D. Реализация моделей технологических процессов АЭС ВВЭР

В рамках работ 2025 года в АСНИ реализованы математические модели технологических процессов, применяемых в действующих системах обращения с ЖРО и ЖРС на АЭС с реакторами типа ВВЭР.

Перечень реализованных процессов включает:

Механические процессы:

- отстаивание, фильтрация, гидроциклонная очистка;
- удаление взвешенных частиц и осветление потоков;

Физико-химические процессы:

- корректировка pH;
- коагуляция и осаждение;
- окислительно-сорбционные методы;

Сорбционные процессы:

- извлечение радионуклидов селективными сорбентами;
- доочистка технологических потоков;

Мембранные процессы:

- нанофильтрация;
- обратный осмос;

Теплотехнические процессы:

- выпаривание;
- концентрирование растворов;
- формирование кубовых остатков;

Процессы кондиционирования:

- формирование твердых радиоактивных отходов;
- подготовка отходов к захоронению.

Указанные процессы реализованы в виде типовых операторов, что обеспечивает возможность их комбинирования при формировании различных технологических схем.

E. Цифровой эксперимент и формирование исходных данных

Ключевым инструментом анализа в АСНИ является цифровой эксперимент, представляющий собой вычислительное исследование поведения ПТЦ при

заданных параметрах входных потоков и структуре технологической схемы.

Для проведения цифрового эксперимента требуется задание полного набора характеристик входных потоков:

$$F = V, A, \vec{C}_{rad}, \vec{C}_{chem}, S_{disp},$$

где V — объемные характеристики, A — активность, \vec{C}_{rad} — радионуклидный состав, \vec{C}_{chem} — химический состав, S_{disp} — дисперсионный (фазовый) состав.

Такая структура данных отражает сложную многокомпонентную природу ЖРС и соответствует современным представлениям о формах существования радионуклидов.

Наполнение системы данными осуществляется в рамках модуля управления данными (Модуль 1), обеспечивающего ввод, хранение, структурирование и верификацию параметров потоков.

В ходе тестирования системы использовались типовые данные о параметрах ЖРС АЭС, сформированные на основе научных публикаций, диссертационных исследований и отраслевых материалов, включая данные о формах существования радионуклидов и их поведении в технологических средах.

F. Использование данных в условиях промышленной эксплуатации

При промышленной эксплуатации АСНИ в качестве исходных данных используются консервативные и верифицированные характеристики потоков, обеспечивающие соответствие результатов моделирования требованиям безопасности.

В качестве источников данных применяются:

- проектная документация АЭС;
- материалы обоснования безопасности;
- данные по характеристикам ЖРО и ЖРС;
- результаты картирования потоков.

Картирование потоков ЖРС отражает источники образования, маршруты движения и параметры потоков в системах обращения с ЖРО и выполняется в рамках работ по совершенствованию комплексов переработки ЖРО.

Использование консервативных данных обеспечивает:

- учет неблагоприятных сценариев;
- повышение надежности результатов;
- применимость результатов моделирования в инженерной практике.

G. Ввод системы в эксплуатацию и регистрация

В 2025 году выполнен комплекс мероприятий по вводу АСНИ в эксплуатацию, включающий:

- проведение приемочных испытаний;
- обучение персонала Заказчика;
- опытную эксплуатацию системы.

Опытная эксплуатация проводилась в период май–август 2025 года и включала отработку основных сценариев применения системы, проведение расчетов для типовых ПТЦ и анализ альтернативных технологических решений.

Результаты испытаний подтвердили работоспособность системы и ее применимость для задач моделирования и оптимизации технологий обращения с ЖРО и ЖРС.

АСНИ зарегистрирована в установленном порядке в качестве программы для ЭВМ[31].

VI. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АСНИ И ДАЛЬНЕЙШИЕ РАБОТЫ

Разработка АСНИ не является завершенным этапом, а представляет собой основу для дальнейшего развития инструментов цифрового моделирования технологий обращения с жидкими радиоактивными отходами. Перспективы развития системы определяются задачами повышения точности моделирования, расширения функциональных возможностей и интеграции с существующей цифровой инфраструктурой атомной отрасли.

Планируемые направления развития АСНИ сформированы в рамках работ по внедрению импорто-независимого средства технологического моделирования и ориентированы на решение прикладных задач проектирования, анализа и оптимизации ПТЦ обращения с ЖРО и ЖРС.

A. Расширение библиотеки моделей и технологических переделов

Одним из ключевых направлений развития является расширение библиотеки моделей технологических процессов и ПТЦ.

В рамках следующего этапа работ предусмотрено:

- разработка и интеграция цифровых моделей новых технологических переделов, включая:
 - о технологии плазменной переработки отходов;
 - о процессы СВЧ-деструкции и парового риформинга;
 - о технологии переработки шламов ЖРО;
- формирование и развитие библиотеки моделей типовых ПТЦ комплексов переработки ЖРО АЭС;
- создание ограниченного набора верифицированных (проверенных) моделей, пригодных для использования в инженерной практике и проектировании.

Особое внимание уделяется формированию библиотек моделей, обеспечивающих воспроизводимость результатов моделирования и их сопоставимость с экспериментальными и эксплуатационными данными.

B. Развитие методов цифрового эксперимента и сценарного анализа

Важным направлением является развитие методов проведения цифровых экспериментов и расширение возможностей анализа альтернативных технологических решений.

Планируется:

проведение серий виртуально-цифровых экспериментов (ВЦЭ) для различных конфигураций ПТЦ;

исследование влияния вариаций параметров входных потоков (объемов, состава, активности) на эффективность технологий;

анализ устойчивости технологических решений к изменению условий эксплуатации;

сопоставление различных технологических схем при одинаковых исходных условиях.

Особое значение имеет возможность:

- анализа сценариев «один поток — разные ПТЦ»;
- анализа сценариев «разные потоки — один ПТЦ»;
- выполнения сравнительного ранжирования технологических решений.

Таким образом, цифровой эксперимент развивается

как основной инструмент выбора оптимальных конфигураций ПТЦ.

C. Развитие методов технико-экономического анализа

Следующий этап развития системы связан с интеграцией методов технико-экономического анализа в контур моделирования.

Планируется:

- разработка и реализация моделей оценки технико-экономических показателей ПТЦ;
 - формирование шаблонов экономических моделей;
 - учет приведенных затрат, стоимости оборудования и эксплуатационных расходов;
 - включение в анализ факторов технологической зрелости и наличия референтного оборудования.
- Реализация данного функционала позволит перейти от чисто технологического анализа к комплексной оценке эффективности решений с учетом экономических факторов.

D. Интеграция с отраслевыми информационными системами

Перспективным направлением является интеграция АСНИ с внешними информационными системами и цифровыми платформами атомной отрасли.

В частности, рассматривается:

- интеграция с системами проектирования АЭС;
- развитие взаимодействия с базами данных оборудования;
- проработка интеграции с системами закупок и управления ресурсами;
- обеспечение передачи результатов моделирования в форматы, используемые при проектировании.

Такая интеграция позволит включить АСНИ в единый цифровой контур проектирования и эксплуатации технологических систем.

E. Развитие функциональности системы

В рамках развития АСНИ (версия 2.0) предусмотрено расширение функциональных возможностей системы, включая:

- реализацию библиотек проверенных моделей переделов и ПТЦ;
- развитие пользовательских интерфейсов;
- внедрение механизмов динамического моделирования;
- реализацию функционала временного исключения отдельных переделов (цифровые байпасы) без изменения структуры ПТЦ;
- совершенствование форматов выходных данных и отчетности.

Отдельным направлением является развитие интеллектуальных функций, включая:

- использование методов искусственного интеллекта для анализа технологических решений;
- проверку соответствия разрабатываемых технологий требованиям нормативной документации.

F. Роль АСНИ в развитии цифровых двойников технологий обращения с ЖРО

Развитие АСНИ направлено на формирование полноценного цифрового двойника технологий обращения с ЖРО и ЖРС.

В этом контексте система рассматривается как:

- инструмент интеграции данных лабораторных исследований, проектных решений и эксплуатационной информации;
- средство сопровождения технологий на всех этапах жизненного цикла;
- основа для перехода к интеллектуальным системам поддержки принятия решений.

Реализация указанных направлений позволит существенно повысить эффективность разработки и внедрения технологий обращения с радиоактивными отходами, а также обеспечить снижение рисков и затрат на всех этапах их жизненного цикла.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена автоматизированная система научных исследований (АСНИ), предназначенная для моделирования, анализа и оптимизации производственно-технологических цепочек обращения с жидкими радиоактивными отходами и средами.

На основе ранее предложенной методологии цифрового моделирования ПТЦ реализован онтологически ориентированный подход, обеспечивающий формализацию технологических потоков, переделов и их взаимосвязей в виде направленного графа преобразований. Это позволило перейти от описательных и фрагментарных представлений технологий к формализованным вычислительным моделям, пригодным для системного анализа, сравнения и оптимизации технологических решений.

В рамках работы разработана и реализована модульная архитектура системы, включающая средства управления данными, базу знаний технологий, модуль моделирования и инструменты анализа и поддержки принятия решений. Реализованный операторный подход к моделированию технологических переделов обеспечивает унификацию описания процессов различной физико-химической природы и их повторное использование при формировании альтернативных ПТЦ. Ключевым научно-практическим результатом является реализация механизма цифрового эксперимента, позволяющего исследовать поведение технологических цепочек при варьировании параметров входных потоков и структуры ПТЦ. Принципиальной особенностью подхода является возможность проведения комбинаторного анализа альтернативных технологических схем, что практически недостижимо в рамках традиционных экспериментальных методов и обеспечивает качественно новый уровень обоснования инженерных решений.

В системе реализованы математические модели технологических процессов, применяемых в действующих комплексах переработки ЖРО АЭС с реакторами типа ВВЭР, включая механические, сорбционные, мембранные, теплотехнические и кондиционирующие переделы. Это обеспечивает практическую применимость АСНИ для решения задач проектирования и оптимизации технологических схем обращения с радиоактивными отходами.

Существенным результатом является также формализация структуры исходных данных для моделирования, включающей данные о параметрах потоков: объемные, радиационные, радионуклидные, химические и дисперсионные характеристики.

Использование консервативных и верифицированных данных, получаемых из проектной документации, материалов обоснования безопасности и результатов картирования потоков ЖРС, обеспечивает согласованность результатов цифрового моделирования с требованиями промышленной эксплуатации и нормативного регулирования.

Разработанная система прошла приемочные испытания, обучение персонала Заказчика и опытную эксплуатацию в 2025 году, по результатам которых подтверждена ее работоспособность и эффективность при решении задач моделирования и анализа ПТЦ. Программное обеспечение АСНИ зарегистрировано в установленном порядке [31], что подтверждает завершенность разработки и возможность ее практического применения. Научная новизна работы заключается в реализации методологии цифрового моделирования производственно-технологических цепочек в виде прикладной программной системы, обеспечивающей интеграцию моделей, данных и алгоритмов анализа в едином вычислительном контуре, а также в формализации цифрового эксперимента как инструмента исследования и оптимизации технологий обращения с ЖРО.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования АСНИ для обоснования выбора технологических схем переработки ЖРО, проведения сценарного анализа и сравнения альтернативных ПТЦ, снижения затрат и сроков разработки технологий, а также повышения обоснованности инженерных решений в условиях неопределенности состава и свойств отходов.

Перспективы дальнейшего развития системы связаны с расширением библиотеки верифицированных моделей технологических процессов и ПТЦ, развитием методов технико-экономического анализа, внедрением динамического моделирования, а также интеграцией с отраслевыми информационными системами и цифровыми платформами атомной отрасли. Реализация указанных направлений позволит сформировать полноценный цифровой двойник технологий обращения с радиоактивными отходами и обеспечить дальнейшее повышение эффективности и безопасности соответствующих технологических решений.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] M.Grieves and J.Vickers “Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems,” in *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves, Eds. Cham: Springer, 2017, pp. 85–113.

[2] F.Tao, H.Zhang, A.Liu, and A.Y.C.Nee Digital twin in industry: State-of-the-art, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, p. 101837, 2019.

[3] A.Rasheed, O.San, and T.Kvamsdal Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020.

[4] W.Kritzinger, M.Karner, G.Traar, J.Henjes, and W.Sihn Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.

[5] M.Grieves Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011.

[6] M.Baldea, T.F.Edgar, B.L.Stanley, and A.A.Kiss Plantwide control and optimization: A perspective from process systems engineering, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 106, pp. 740–750, 2017.

[7] R.Gani, Product-process design — The new frontier in process systems engineering, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 126, pp. 140–151, 2019.

[8] F.Tao, Q.Qi, A.Liu, and A.Kusiak Data-driven smart manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 157–169, 2018.

[9] K.Nandakumar, J.B.Joshi, K.T.Valsaraj, and K.D.P.Nigam Perspectives on manufacturing innovation in chemical process industries, *ACS Engineering Au*, vol. 2, no. 3, 2022.

[10] D.Mourtzis Simulation in the design and operation of manufacturing systems: State of the art and new trends, *International Journal of Production Research*, 2020.

[11] M.Hotvedt, B.Grimstad, D.Ljungquist, and L.Imsland On gray-box modeling for virtual flow metering, *Control Engineering Practice*, vol. 118, 2022.

[12] M.Azango, J.Salmi, I.Yrjola, and J.Bensky Hybrid digital twin for process industry using Apros simulation environment, in *Proc. IEEE ETFA*, 2021.

[13] G.Pahl, W.Beitz, J.Feldhusen, and K.H.Grote Engineering design: A systematic approach. Berlin: Springer, 2007.

[14] В.В.Глухов, А.И.Ковалев, Е.А.Ткаченко Моделирование и оптимизация производственных систем. СПб.: Питер, 2014.

[15] С.С.Петров, И.В.Гоменюк, О.В.Корнюшкина, А.В.Матвеевко, А.В.Родин, Д.М.Шкурьгин, П.М.Шкурьгин Оценка безопасности применения технологии кондиционирования ОИОС методом их осушки (обезвоживания), *Радиоактивные отходы*, no. 3 (28), pp. 7–18, 2024.

[16] В.В.Милютин, В.О.Каптаков, Р.А.Пензин, С.С.Петров, Л.В.Ходалев, О.В.Корнюшкина, А.В.Матвеевко Разработка перспективной мембранно-сорбционной технологии очистки от радионуклидов жидких радиоактивных отходов АЭС с реакторными установками нового поколения ВВЭР-1200/ТОИ, *Радиоактивные отходы*, no. 4 (33), pp. 29–43, 2025.

[17] А.Е.Савкин, Ю.Т.Сластеников, Е.Е.Осташкина, С.С.Петров, Л.В.Ходалев, А.В.Матвеевко, А.А.Кашенко Разработка технологии очистки кубовых остатков ВВЭР-1200 от радионуклидов, *Радиоактивные отходы*, no. 4 (33), pp. 18–28, 2025.

[18] Сборник тезисов XII международной научной конференции радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях 29–31 октября 2025 г. Москва, Президиум РАН

[19] XI Российская конференция РАДИОХИМИЯ-2025 Сборник тезисов Г. Красноярск 13–17 октября 2025 г.

[20] International Atomic Energy Agency: Modelling of industrial processes in the treatment of radioactive waste. Vienna: IAEA, 2018.

[21] Информационное сообщение ВНИИАЭС: отделение общестанционных технологий. 2025 <https://vniiaes.ru/upload/%D0%94%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B0%D0%B5%D0%B2%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F.pdf>

[22] Информационное сообщение: Совещание по вопросам НИОКР по разработке малоотходных технологий переработки и кондиционирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО) 2023 https://alexplus.ru/%D0%A1%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%82%D0%B8%D1%8F/2023/2023-09-14_%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0.html

[23] Д.В.Адамович Система обращения с РАО АО «Концерн Росэнергоатом». Роль эксплуатирующей организации в формировании системы управления РАО. Задачи по развитию инфраструктуры. 2025 http://sng-atom.com/files/news/files/109/763/1763371892_37d1a03fc23192667.pdf

[24] М.Г.Жабицкий, Ю.А.Андриенко, Ю.Н.Конов, Г.В.Свердлик, В.Н.Мальшев “Концепция инструментов цифрового моделирования комплексных технологий на полном жизненном цикле инновационных производств,” *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 13, no. 8, pp. 41–50, 2025.

[25] М.Г.Жабицкий, В.Е.Мельников, О.В.Бойко Цифровой двойник сложного инженерного объекта — базовый концепт интеллектуальной трансформации энергетики, Труды конф. «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», Воронеж, 2020.

[26] М.Г.Жабицкий, С.А.Ожерельев, Г.В.Тихомиров Концепция комплексного цифрового двойника сложного инженерного объекта, *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 9, no. 8, pp. 43–51, 2021.

[27] Федеральный закон Российской Федерации от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

[28] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-058-14. «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами». Утв. приказом Ростехнадзора от 30 декабря 2014 г. № 600.

[29] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-019-15. «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов». Утв. приказом Ростехнадзора от 15 октября 2015 г. № 415.

[30] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-055-14. «Захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности». Утв. приказом Ростехнадзора от 22 декабря 2014 г. № 584.

[31] Ю.А.Андриенко, Е.С.Анненкова, М.Г.Жабицкий, О.В.Золотарева, Ю.Н.Конев, В.В.Коньков, П.А.Кузнецова, А.А.Любарский, А.Е.Мазуров, Г.А.Повальнова, А.С.Серова, В.А.Сычев, К.В.Цыгулева Программа для ЭВМ «ВЕРСИЯ 1.0 АСНИ» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2025694053, заявка № 2025692238, регистрация 19.11.2025, публикация 03.12.2025. Правообладатель: Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях»

Статья получена 12 апреля 2026. Исследование выполнено при финансовой поддержке АО ВНИИАЭС ГК Росатом в рамках договора № 00-3-700-0104.

Ю.А.Андриенко – доцент ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: YAAndrienko@mephi.ru)

Е.С.Анненкова– инженер ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: ESAnnenkova@mephi.ru)

О.В.Бойко – старший преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: OVBoyko@mephi.ru)

В.М.Жабицкий- студент Московского политехнического университета (slava_jab@mail.ru)

М.Г.Жабицкий– заместитель директора ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: jabitsky@mail.ru)

О.В.Золотарева– заместитель начальника отдела ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: OVZolotareva@mephi.ru)

В.В.Коньков– преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: VVKonkov@mephi.ru)

П.А.Кузнецова– лаборант ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: PAKuznetsova@mephi.ru)

М.Ю.Кузов– магистрант ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: MYKuzov@mephi.ru)

Ю.Н.Конев– заместитель начальника отдела ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: YNKonev@mephi.ru)

А.А.Любарский– преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: AALubarskii@mephi.ru)

А.Е.Мазуров– инженер ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: AEMazurov@mephi.ru)

Г.А.Повальнова– ведущий инженер ИПЯТ НИЯУ МИФИ (e-mail: GAPovalnova@mephi.ru)

А.С.Серова– преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: AASerova@mephi.ru)

В.А.Сычев– старший преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: VASytchov@mephi.ru)

К.В.Цыгулева– ассистент ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: KVTsiguleva@mephi.ru)

Digital Modeling Automated System for Liquid NPP Radioactive Media Treatment

Yu.A. Andrienko, E.S. Annenkova, V.M. Zhabitskii, M.G. Zhabitskii, O.V. Zolotareva, Yu.N. Konev, V.V. Konkov, P.A. Kuznetsova, M.Y. Kuzov, A.A. Lyubarsky, A.E. Mazurov, G.A. Povalnova, A.S. Serova, V.A. Sychev, K.V. Tsyguleva

Abstract—The development and implementation of treatment technologies for the liquid radioactive waste (LRW) and liquid radioactive media (LRC) of nuclear power plants are among the most complex tasks of the modern nuclear power industry. The paper presents scientific research automated system (SRAS) designed for digital modeling, analysis and optimization of production and technological chains (PTC) for the management of LRW and an ontologically oriented approach that provides formalization of technological flows, redistributions and their interrelations in the form of a directed graph of transformations. A modular architecture has been developed, including data management tools, a technology knowledge base, a modeling module, and analysis and decision support tools. The system implements mathematical models of technological processes used in the existing LRW reprocessing complexes of NPPs with VVER reactors. The key mechanism is a digital experiment that makes it possible to study the behavior of PTCs when varying the parameters of input streams and the structure of the chain. The system passed acceptance tests and trial operation in 2025 and is registered as a computer program.

Keywords: automated system, digital modeling, production and technological chain, liquid radioactive waste, digital experiment, VVER.

REFERENCES

- [1] M.Grieves and J.Vickers "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," in *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves, Eds. Cham: Springer, 2017, pp. 85–113.
- [2] F.Tao, H.Zhang, A.Liu, and A.Y.C.Nee Digital twin in industry: State-of-the-art, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 61, p. 101837, 2019.
- [3] A.Rasheed, O.San, and T.Kvamsdal Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020.
- [4] W.Kritzinger, M.Karner, G.Traar, J.Henjes, and W.Sihn Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.
- [5] M.Grieves Virtually perfect: Driving innovative and lean products through product lifecycle management. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011.
- [6] M.Baldea, T.F.Edgar, B.L.Stanley, and A.A.Kiss Plantwide control and optimization: A perspective from process systems engineering, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 106, pp. 740–750, 2017.
- [7] R.Gani, Product-process design — The new frontier in process systems engineering, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 126, pp. 140–151, 2019.
- [8] F.Tao, Q.Qi, A.Liu, and A.Kusiak Data-driven smart manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 157–169, 2018.
- [9] K.Nandakumar, J.B.Joshi, K.T.Valsaraj, and K.D.P.Nigam Perspectives on manufacturing innovation in chemical process industries, *ACS Engineering Au*, vol. 2, no. 3, 2022.
- [10] D.Mourtzis Simulation in the design and operation of manufacturing systems: State of the art and new trends, *International Journal of Production Research*, 2020.
- [11] M.Hotvedt, B.Grimstad, D.Ljungquist, and L.Imslund On gray-box modeling for virtual flow metering, *Control Engineering Practice*, vol. 118, 2022.
- [12] M.Azangoo, J.Salmi, I.Yrjola, and J.Bensky Hybrid digital twin for process industry using Apros simulation environment, in *Proc. IEEE ETFA*, 2021.
- [13] G.Pahl, W.Beitz, J.Feldhusen, and K.H.Grote Engineering design: A systematic approach. Berlin: Springer, 2007.
- [14] V.V.Gluhov, A.I.Kovalev, E.A.Tkachenko Modelirovanie i optimizacija proizvodstvennyh sistem. SPb.: Piter, 2014.
- [15] S.S.Petrov, I.V.Gomenyuk, O.V.Kornyushkina, A.V.Matveenko, A.V.Rodin, D.M.Shkurygin, P.M.Shkurygin Safety Assessment of the Use of Conditioning Technology by Drying (Dehydration), *Radioactive Waste*, no. 3 (28), pp. 7–18, 2024.
- [16] V.V.Milyutin, V.O.Kaptakov, R.A.Penzin, S.S.Petrov, L.V.Khodalev, O.V.Kornyushkina, A.V.Matveenko Development of a Promising Membrane-Sorption Technology for Radionuclide Purification of Liquid Radioactive Waste from NPPs with New Generation VVER-1200/TOI Reactor Plants, *Radioactive Waste*, no. 4 (33), pp. 29–43, 2025.
- [17] A.E.Savkin, Yu.T.Slastennikov, E.E.Ostashkina, S.S.Petrov, L.V.Khodalev, A.V.Matveenko, A.A.Kashchenko Development of a Technology for Radionuclide Removal of VVER-1200 Vat Residues, *Radioactive Waste*, no. 4 (33), pp. 18–28, 2025.
- [18] Abstracts of the XII International Scientific Conference Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies October 29–31, 2025 Moscow, Presidium of the Russian Academy of Sciences
- [19] XI Russian Conference RADIOCHEMISTRY-2025: Collection of Abstracts, Krasnoyarsk, October 13-17, 2025.
- [20] International Atomic Energy Agency: Modelling of industrial processes in the treatment of radioactive waste. Vienna: IAEA, 2018.
- [21] VNIIAES Information Message: Department of Plant Technologies. <https://vniiaes.ru/upload/%D0%94%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B0%D0%B5%D0%B2%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F.pdf> 2025
- [22] Announcement: R&D Meeting on the Development of Low-Waste Technologies for Processing and Conditioning of Liquid Radioactive Waste (LRW) 2023 https://alexplus.ru/%D0%A1%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%82%D0%B8%D1%8F/2023/2023-09-14_%D0%A1%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0.html
- [23] D.V.Adamovich Radioactive Waste Management System of Rosenergoatom Concern JSC. The role of the operating organization in the formation of the radioactive waste management system. Tasks for the development of infrastructure. 2025 http://sng-atom.com/files/news/files/109/763/1763371892_37d1a03fc23192667.pdf
- [24] M.G.Zhabitsky, Yu.A.Andrienko, Yu.N.Konev, G.V.Sverdlik, V.N.Malyshv "The Concept of Digital Modeling Tools for Integrated Technologies at the Full Life Cycle of Innovative Industries," *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 13, no. 8, pp. 41–50, 2025.
- [25] M.G.Zhabitsky, V.E.Melnikov, O.V.Boyko The Digital Twin of a Complex Engineering Object — the Basic Concept of Intelligent Transformation of Energy, *Proceedings of Conf. "Alternative and Intelligent Energy"*, Voronezh, 2020.
- [26] M.G. Zhabitsky, S.A. Ozherelyev, G.V. Tikhomirov The Concept of a Complex Digital Twin of a Complex Engineering Object, *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 9, no. 8, pp. 43–51, 2021.
- [27] Federal Law of the Russian Federation of July 11, 2011 No 190-FZ "On Radioactive Waste Management and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation".
- [28] Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use. NP-058-14. "Safety in Radioactive Waste Management". Approved. Order of Rostekhnadzor dated December 30, 2014 No 600.
- [29] Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use. NP-019-15. "Collection, processing, storage and conditioning of liquid

radioactive waste". Approved. Order of Rostekhnadzor dated October 15, 2015 No 415.

[30] Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use. NP-055-14. "Disposal of radioactive waste. Safety Requirements". Approved. Order of Rostekhnadzor dated December 22, 2014 No 584.

[31] Yu.A.Andrienko, E.S.Annenkova, M.G.Zhabitsky, O.V.Zolotareva, Yu.N.Konev, V.V.Konkov, P.A.Kuznetsova, A.A.Lyubarsky, A.E.Mazurov,

G.A.Povalnova, A.S.Serova, V.A.Sychev, K.V.Tsyguleva Computer Program "VERSION 1.0 ASNI" Certificate of State Registration of the Computer Program No RU 2025694053, Application No 2025692238, registration 19.11.2025, publication 03.12.2025. Copyright holder: Russian Concern for Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants (Rosenergoatom OJSC).