

СТАНОВЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

© 2023 г. Д. Н. Колупаев, Г. А. Апальков*

Горно-химический комбинат, 662978, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, д. 53
*e-mail: sibghk@rosatom.ru

Поступила в редакцию 09.01.2023, после доработки 09.01.2023, принята к публикации 30.01.2023

Представлен обзор основных предпосылок создания и развития промышленных радиохимических производств в СССР и РФ. Приведена история обращения с отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) применительно к заводам РТ-1 и РТ-2, особенности заводов, рассмотрен их исторический облик и задачи с позиции сегодняшнего дня. Проведен анализ сложившейся профильности площадок ПО «Маяк», Горно-химического комбината и Сибирского химического комбината замкнутого ядерного топливного цикла РФ. Сформулированы актуальные вопросы применительно к технологиям переработки ОЯТ и обращения с радиоактивными отходами.

Ключевые слова: ядерный щит, ПО «Маяк», Горно-химический комбинат, Сибирский химический комбинат, радиохимические технологии, отработавшее ядерное топливо, уран-плутониевое топливо, радиоактивные отходы, завод РТ-1, завод РТ-2, Опытно-демонстрационный центр, Опытно-демонстрационный энергетический комплекс.

DOI: 10.31857/S0033831123020016, **EDN:** WUEVBW

ВВЕДЕНИЕ

Историческая справка. Создание ядерного щита

Развитие радиохимии и становление радиохимических технологий в период с середины 1940-х и до конца 1970-х гг. было обусловлено единственной целью – достижением паритета СССР с США в количестве ядерных зарядов. Учитывая критическое соотношение ядерных зарядов (в разной степени готовности) – 10 к 400 не в пользу СССР, к 1950-м гг. было принято решение о создании трех заводов типа Б для выделения оружейного плутония из облученных стандартных урановых блоков промышленных уран-графитовых реакторов с размещением на площадках комбинатов № 817 (ПО Маяк), Озерск), № 816 (Сибирский химический комбинат, СХК, Северск) и № 815 (Горно-химический комбинат, ГХК, Железногорск).

Несмотря на идентичность задач, стоящих перед заводами Б, а также сопоставимые показатели по производительности и качеству выпускаемой предприятиями продукции, «исторически» и техно-

логически сложились и сформировались подходы, заложенные и получившие развитие в ходе эксплуатации на соответствующих площадках (табл. 1).

В конечном итоге паритет с США по количеству ядерных зарядов был достигнут к концу 1970-х гг. С учетом работы ученых и технологов в области радиохимии «по инерции» в течение последующих 15–20 лет определение «новой» цели, соизмеримой и способной стать драйвером роста и развития для «ренессанса» радиохимических технологий в рамках уже Второго атомного проекта, крайне актуально в настоящее время.

ИСТОРИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ В РОССИИ

Роль ПО «Маяк» и ГХК. Заводы РТ-1 и РТ-2

В Советском Союзе с появлением первых атомных подводных лодок и АЭС было принято решение о реализации замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) как по оборонным, так и по гражданским направлениям. И до настоящего времени от этого тезиса не отходят и в РФ. В контексте приня-

Таблица 1. Сложившиеся особенности технологий радиохимических заводов

Характеристика	Комбинат № 815 (ГХК)	Комбинат № 817 (ПО «Маяк»)	Комбинат № 816 (СХК)
Размещение производств	Подземное (подгорная часть)	Наземное	Наземное
Технология переработки (ОСУБ ^а)	Осадительная (с момента запуска), экстракционная, сорбционная		
Экстракция. Разбавитель	Тяжелый (ОСУБ)	Тяжелый (ОСУБ), легкий (ОЯТ)	Легкий (ОСУБ)
Экстракция. Оборудование	Смесители-отстойники	Смесители-отстойники	Колонны
Утилизация жидких радиоактивных отходов	Кондиционирование, подземное захоронение	Сброс, остекловывание	Кондиционирование, подземное захоронение

^а Облученные стандартные урановые блоки промышленных уран-графитовых реакторов.

того подхода решение о строительстве завода РТ-1 по переработке ОЯТ энергетических реакторов и транспортных установок было принято еще в начале 1960-х гг. Площадка ПО «Маяк» при этом была определена местом размещения планируемого завода (рассматривалась также и площадка СХК), в том числе с учетом опыта эксплуатации первого в отрасли радиохимического завода и необходимости совершенствования исходных проектных технологических решений. Так, например, широко применяемые в химической технологии подходы оказались трудно применимы или неприемлемы в условиях введенного ранее в эксплуатацию радиохимического завода 25 (материалы аппаратов, запорная арматура, компоновка завода и т.п.).

С 1971 г. на ПО «Маяк» действует хранилище ОЯТ, с 1977 г. – завод РТ-1 по переработке ОЯТ (рис. 1).

Задача завода РТ-1, изначально не планировавшегося в качестве серийного производства, состояла в переработке, в первую очередь, облученного топлива реакторных установок (РУ) ВВЭР-440 и

довольно специфичного в переработке «лодочного» ОЯТ.

В настоящее время завод РТ-1 осуществляет переработку различных видов ОЯТ:

- энергетических реакторов типа ВВЭР, РБМК, БН;
- транспортных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) и исследовательских реакторов (ИР).
- дефектного ОЯТ.

Профильность же планировавшегося к созданию на площадке ГХК завода РТ-2 изначально заключалась в переработке серийных видов ОЯТ – ВВЭР-1000 (в перспективе 1200). В 1970–1980-х гг. выполнялось проектирование, начато строительство на ГХК завода РТ-2 по переработке ОЯТ ВВЭР-1000, в 1985 г. введена первая очередь завода РТ-2 – «мокрое» хранилище ОЯТ ВВЭР-1000 (рис. 2).

Завод РТ-2 рассматривался как логическое развитие технологий РТ-1. Заложенные при создании завода РТ-2 принципы сводились к следующим:

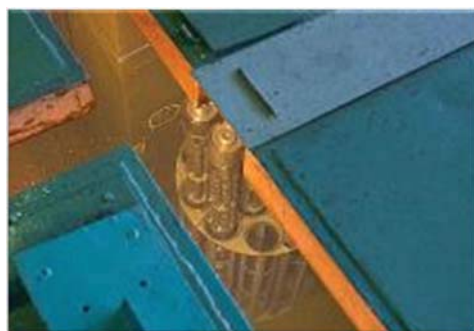


Рис. 1. Инфраструктура завода РТ-1: хранилище ОЯТ и горячие камеры.



Рис. 2. Строительная площадка завода РТ-2, «мокрое» хранилище ОЯТ ВВЭР-1000.

РТ-2 – логическое развитие завода РТ-1: от универсальности (ОЯТ ЯЭУ, ИР) к монопереработке серийного ОЯТ (ВВЭР-1000/1200);

сквозная проверка заложенных в схему РТ-2 технологических процессов и оборудования на РТ-1 и площадках отраслевых институтов.

комплексность: реализация в рамках единой площадки переработки ОЯТ и фабрикации уран-плутониевого топлива (УПТ) из продуктов переработки.

В течение 1980–2000-х гг. проводилась разработка технологий для развития РТ-1 и создания РТ-2. Окончательный облик завода РТ-2 сложился к 1992 г. [1].

По результатам разработки комплексной технологической схемы переработки ОЯТ на заводе РТ-2 (рис. 3) полная производительность по урану должна была составлять 1500 т/год, готовой продукцией завода РТ-2 являлись плав гексагидрата нитрата уранила (ГНУ), направляемый на дальнейшее дообогащение, и смешанное уран-плутониевое топливо в виде тепловыделяющих сборок (ТВС) для реакторов ВВЭР-1000 [1].

Технология переработки ОЯТ РТ-2 включала операцию фракционирования с получением фракций стронция–цезия, ТПЭ–РЗЭ. Метод подземного захоронения жидких высоко- (ВАО) и среднеактивных отходов (САО) был исключен. Переработка жидких ВАО и САО предполагала их упаривание с отверждением кубовых остатков методом остекловывания и цементирования. Жидкие низкоактивные отходы (НАО), в том числе тритиевые конденсаты, предполагалось направлять на подземное захоронение [1].

В связи с наличием отложенных и не имевших перспектив решений в момент разработки, в пер-

вую очередь, в части обращения с РАО, а также вследствие других объективных причин 1990-х гг. завод РТ-2 в планировавшемся облике так и не был достроен.

Тем не менее, облик завода РТ-2, если рассматривать его с позиции сегодняшнего дня, не претерпел серьезных изменений. Отличия заключаются лишь в избыточной, по меркам современного подхода, производительности: в настоящее время обликом завода РТ-2 представляется тиражируемый модуль, объединяющий переделы переработки ОЯТ и фабрикации свежего топлива. Производительность модуля переработки при этом составляет порядка 600-800 т ОЯТ/год (окончательная мощность требует расчетного обоснования). В качестве безальтернативной технологии гидрометаллургической переработки ОЯТ следует рассматривать Пурекс-процесс (классический, упрощенный или усовершенствованный), с возможностью фракционирования «короткоживущей» фракции ВАО от переработки ОЯТ (при необходимости). Конечные продукты переработки ОЯТ представляют собой ГНУ (для дальнейшего дообогащения) или уран в форме октаоксида триурана (закиси-окиси для «короткой» схемы – прямого направления на сублимацию), а также диоксид плутония для топливообеспечения энергетических реакторов на быстрых или тепловых нейтронах, поступающий в интегрированный модуль фабрикации УПТ.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ НА ФГУП «ГХК»

Миссия ГХК

Вектор поэтапного приближения к концептуальной модели завода РТ-2 обусловил развитие и

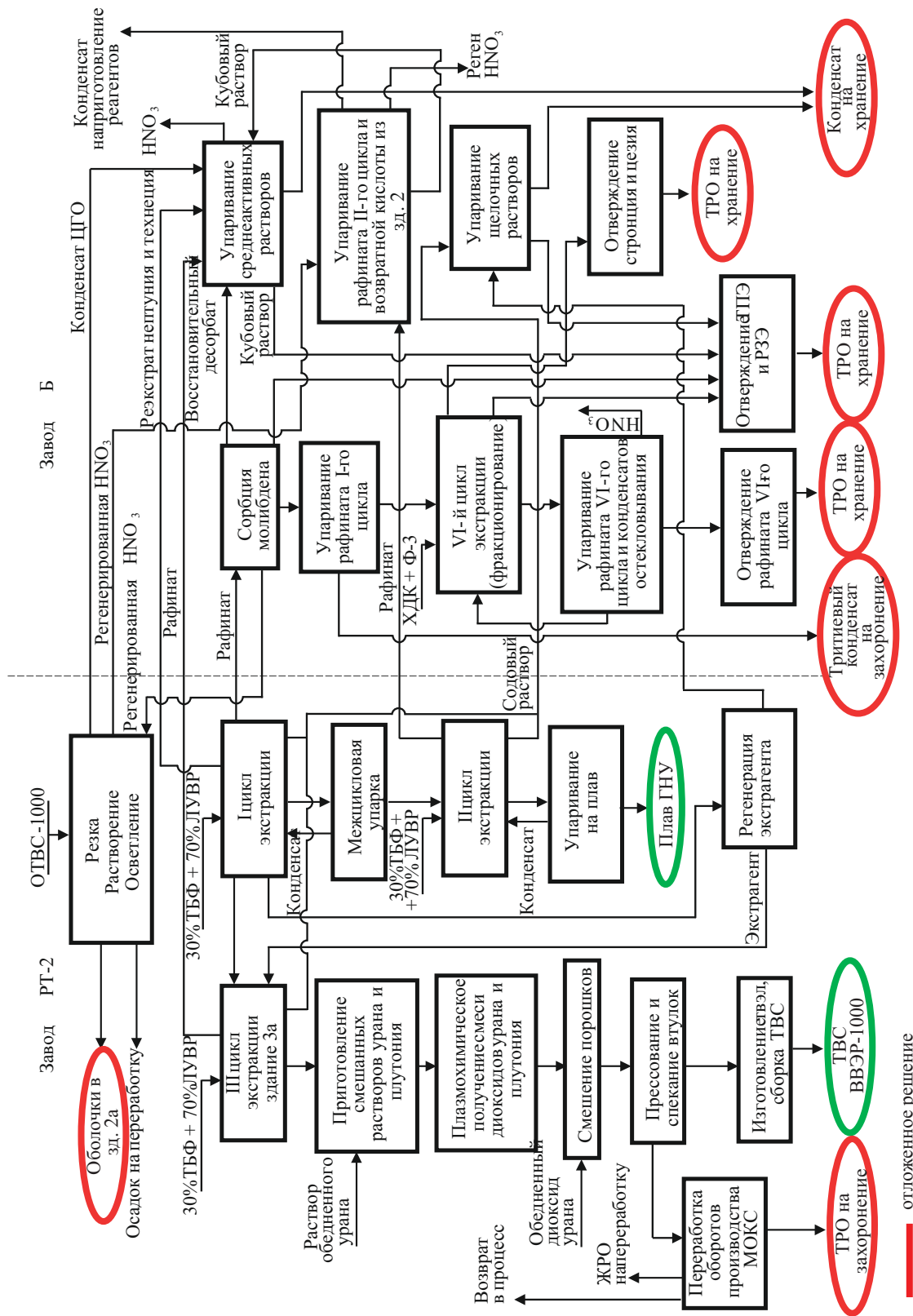


Рис. 3. Комплексная технологическая схема переработки ОЯТ на заводе РТ-2 [1]. Аббревиатуры: ОТВС – отработавшие тепловыделяющие сборки, цех газоочистки (ЦГО), ТБФ – трибутилфосфат, ЛУВР – легкий углеводородный разбавитель, ХДК – хлорированный дикарболлид кобальта, МОКС – смешанное оксидное топливо, ТРО – твердые радиоактивные отходы.



Рис. 4. Площадка Завода регенерации топлива (ЗРТ) ГХК.

формирование современного облика предприятия, включающего комплекс хранилищ ОЯТ РУ ВВЭР-1000 («мокрого» с 1985 г. и «сухого» с 2015 г.) и РБМК-1000 («сухих», 2011, 2015 гг.), опытно-демонстрационный центр (ОДЦ) по переработке ОЯТ РУ ВВЭР-1000 (2015, 2023 гг.) на площадке Завода регенерации топлива (ранее – Изотопно-химический завод, рис. 4), а также производство уран-плутониевого МОКС-топлива для РУ БН-800 (2015 г.) с установкой переочистки плутония на площадке Завода фабрикации топлива (созданного на базе Радиохимического завода).

Развитие вышеуказанной промышленной инфраструктуры сформировало современную миссию ГХК, заключающуюся в «создании полного технологического комплекса в области обращения с отработавшим ядерным топливом энергетических реакторов и замыкании ядерного топливного цикла для обеспечения России экологически чистой и безопасной энергией атома».

СОЗДАНИЕ ОДЦ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОЯТ

Опытно-демонстрационный центр (ОДЦ) по переработке ОЯТ на ГХК концептуально представляет собой опытное радиохимическое производство, предназначенное для отработки новых решений и впервые разработанного оборудования с целью выдачи исходных данных для будущего полномасштабного завода (РТ-2), среди основных целей соз-

дания которого (согласно ТЗ на разработку проекта ОДЦ, 2008 г.) следует выделить следующие:

- создание ОДЦ по радиохимической переработке ОЯТ реакторов АЭС различного типа (базовый вид ОЯТ – ВВЭР-1000);
- отработка нового, перспективного оборудования для проверки новых технологических процессов переработки ОЯТ, методов по обращению с РАО и проведению испытаний масштабных экспериментальных работ;
- получение исходных данных для проектирования, строительства и пуска крупномасштабного завода по переработке ОЯТ;
- оценка возможности переработки ОТВС с «проблемным» топливом;
- отсутствие сброса ЖРО от переработки ОЯТ.

В настоящее время эксплуатация ОДЦ на ГХК (рис. 5), начиная с 2015 г., осуществляется в объеме «первого» пускового комплекса, представляющего собой комплекс исследовательских горячих камер (ИГК) с аналитической лабораторией. Инфраструктура комплекса ИГК ОДЦ, включающая девять исследовательских камер, позволяет реализовать полный цикл переработки ОЯТ с отработкой и проверкой режимов применительно к базовой технологии ОДЦ в полном развитии. В настоящее время на объекте выполняется ряд исследовательских работ, связанных с переработкой рафинатов, сорбционным



Рис. 5. Опытно-демонстрационный центр (ОДЦ) по переработке ОЯТ на ГХК.

выделением цезия и стронция, отверждением ВАО в связке СВЧ-денитрации с плавлением в муфельной печи и др. Завершение строительства ОДЦ в полном развитии ожидается в 2023 г., ввод в эксплуатацию и начало переработки ОЯТ – в 2025 г. [3].

К сожалению, в начале 2000-х гг. на этапе проектирования ОДЦ произошел разрыв связи РТ-1 и РТ-2, в результате которого разработчики технологий ОДЦ отступили от сложившейся ранее практики в пользу реализации инновационных решений в технологии ОДЦ, не в полной мере используя при этом опыт и потребности площадки РТ-1 для возможности опробования и подбора наиболее оптимальных решений для проекта ОДЦ. Это же обстоятельство относится и к целевым продуктам переработки ОЯТ: на этапе проектирования не были должным образом сформулированы требования к конечным продуктам переработки, в качестве которых проектом были предусмотрены порошок октаоксида триурана (закиси-окиси) и порошок смешанных оксидов урана, плутония и нептуния.

С позиции сегодняшнего дня происходит переосмысление как непосредственно проектных технологий ОДЦ, так и конечных продуктов переработки ОЯТ энергетических реакторов для целей топливообеспечения действующего реактора БН-800 и создаваемых БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М. В 2022 г. принято решение о внесении изменений в базовую технологию ОДЦ с установлением ГНУ и диоксида плутония в качестве целевых продуктов переработки ОЯТ для обеспечения потребности реакторов на быстрых (РБН) и тепловых нейтронах (РТН) в регенерированных материалах [2, 3].

На основании вышеуказанного решения начиная с 2023 г. планируется модернизация технологических отделений ОДЦ. Основным, реализовавшимся уже к настоящему времени риском является обеспечение работоспособности критически важного оборудования и его ремонтпригодность. По результатам пуско-наладочных работ на ОДЦ выявлены основные направления (технологические переделы) для превентивных исследований для принятия своевременных решений о внесении необходимых изменений. К таковым относятся операции и оборудование рубки и волоксидации ОЯТ, растворения и осветления (центрифуги) ОЯТ, упаривания и остекловывания ВАО, получения порошка смешанных оксидов актинидов (по проекту), денитрации уранилнитрата, хранения отработавшего экстрагента.

С учетом вышеизложенного, исходя, в том числе, из основных положений актуализированной в 2022 г. Концепции обращения с ОЯТ Госкорпорации «Росатом» на 2023–2035 гг. и перспективы до 2050 г., предполагается следующая стратегия эксплуатации и развития ОДЦ:

1-й этап – разрешение на ввод в эксплуатацию ОДЦ по переработке ОТВС РУ ВВЭР-1000;

2-й этап – техническое перевооружение отделений ОДЦ, начало переработки ОЯТ ВВЭР-1000 с получением востребованных в двухкомпонентной ядерной энергетике РФ целевых продуктов переработки;

3-й этап – реконструкция ОДЦ с созданием интегрированного модуля фабрикации уран-плутониевого топлива (РЕМИКС-С/гет. и др.) в концепции двухкомпонентной ядерной энергетике РФ.

СЛОЖИВШАЯСЯ ПРОФИЛЬНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛОЩАДОК КОМБИНАТОВ

Аналогично сложившимся на этапе создания и становления радиохимических производств трех комбинатов ГХК, ПО «Маяк» и СХК во второй половине прошлого века особенностям технологий и подходов (представленным в табл. 1) на современном этапе развития сформировалась четкая профильность каждой из промышленных площадок с собственной стратегией развития.

Так, перспективы развития ПО «Маяк» связаны с запланированной модернизацией завода РТ-1



Рис. 6. Площадка завода РТ-1 на ПО «Маяк».

(рис. 6) с целью увеличения производительности и расширения номенклатуры перерабатываемого ОЯТ [2].

СХК сформировался в качестве референтной площадки демонстрации ЗЯТЦ РБН, отладки технологий обращения со свежим и отработавшим нитридным топливом РБН в рамках Опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК, рис. 7) – прототипа серийного в перспективе Промышленного энергокомплекса (ПЭК).

ГХК, в свою очередь, продолжает следовать заложенной на этапе формирования облика завода РТ-2 идеологии создания полного цикла обращения с ОЯТ серийных РТН. Возможность максимального задействования действующей инфраструктуры площадки ЗРТ (комплекса «мокрого» и «сухих» хранилищ ОЯТ, ОДЦ) наряду с опытом промышленной эксплуатации производства МОКС-топлива для РУ БН-800 Белоярской АЭС позволяет считать целесообразным размещение на ГХК завода (модуля) РТ-2 для переработки ОЯТ и фабрикации свежего топлива серийных энергетических реакторов для обеспечения внутренних потребностей РФ (рис. 8).

Стартовавшие работы над проектом создания на ГХК в среднесрочной перспективе исследовательского жидкосолевого реактора с перспективой создания промышленного реактора-сжигателя минорных актинидов от переработки ОЯТ логично вписывается и завершает облик единого технологического кластера (комплекса) производств по обращению с ОЯТ в составе мощностей по хранению и переработке ОЯТ, фабрикации уран-плутониевого топлива из продуктов переработки ОЯТ, инфраструктуру по утилизации высоко радиотоксичных минорных актинидов с возможностью глубинного

захоронения ВАО (Подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ) Нижнеканского массива), что позволит:

- добиться минимальных издержек и экологических рисков;
- минимизировать перевозки плутония и регенерированного урана;
- применить технологии фракционирования ВАО и дожигания минорных актинидов.

Сложившаяся профильность и распределение решаемых в области замыкания ЯТЦ задач между тремя предприятиями не только не лишены практического смысла, но и могут являться взаимобогащающими при выстраивании оптимальной кооперации, исходя из принципиальных положений и путей реализации одобренной в апреле 2022 г. Стратегическим советом Госкорпорации «Росатом» Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г., являясь прообразом создаваемой двухкомпонентной ядерной энергетики РФ [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

В разделе сформулирован ряд актуальных вопросов и вызовов, в некоторой степени провокационных по своей сути, но требующих осмысления и поиска согласованного решения в самое ближайшее время.

1. Концепция и задачи развиваемого Госкорпорацией «Росатом» продуктового направления «Сбалансированный ЯТЦ», представляющего собой «...комплекс продуктов и услуг и уникальную бизнес-модель для зарубежных АЭС от переработ-

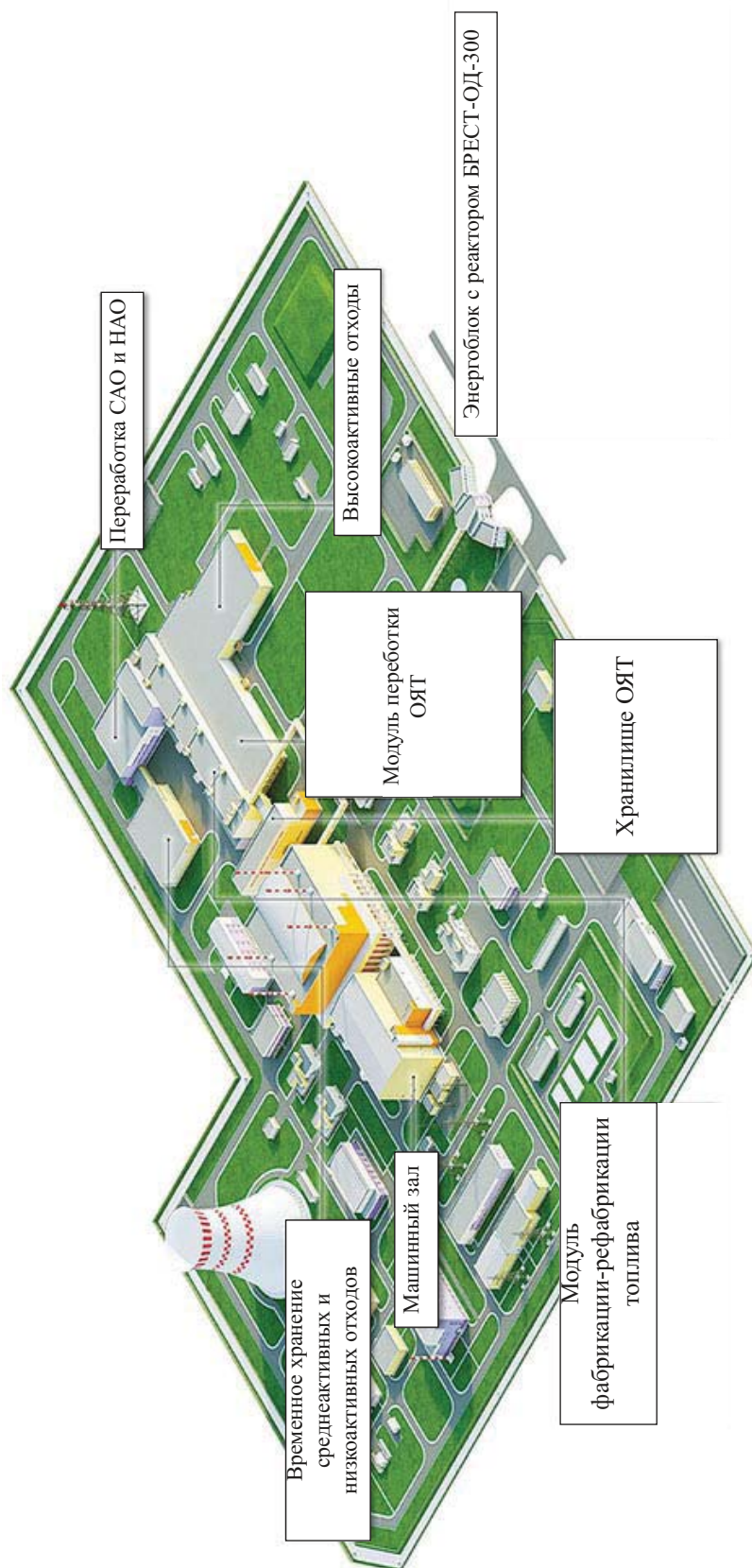


Рис. 7. Площадка Опытного-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) СХК.

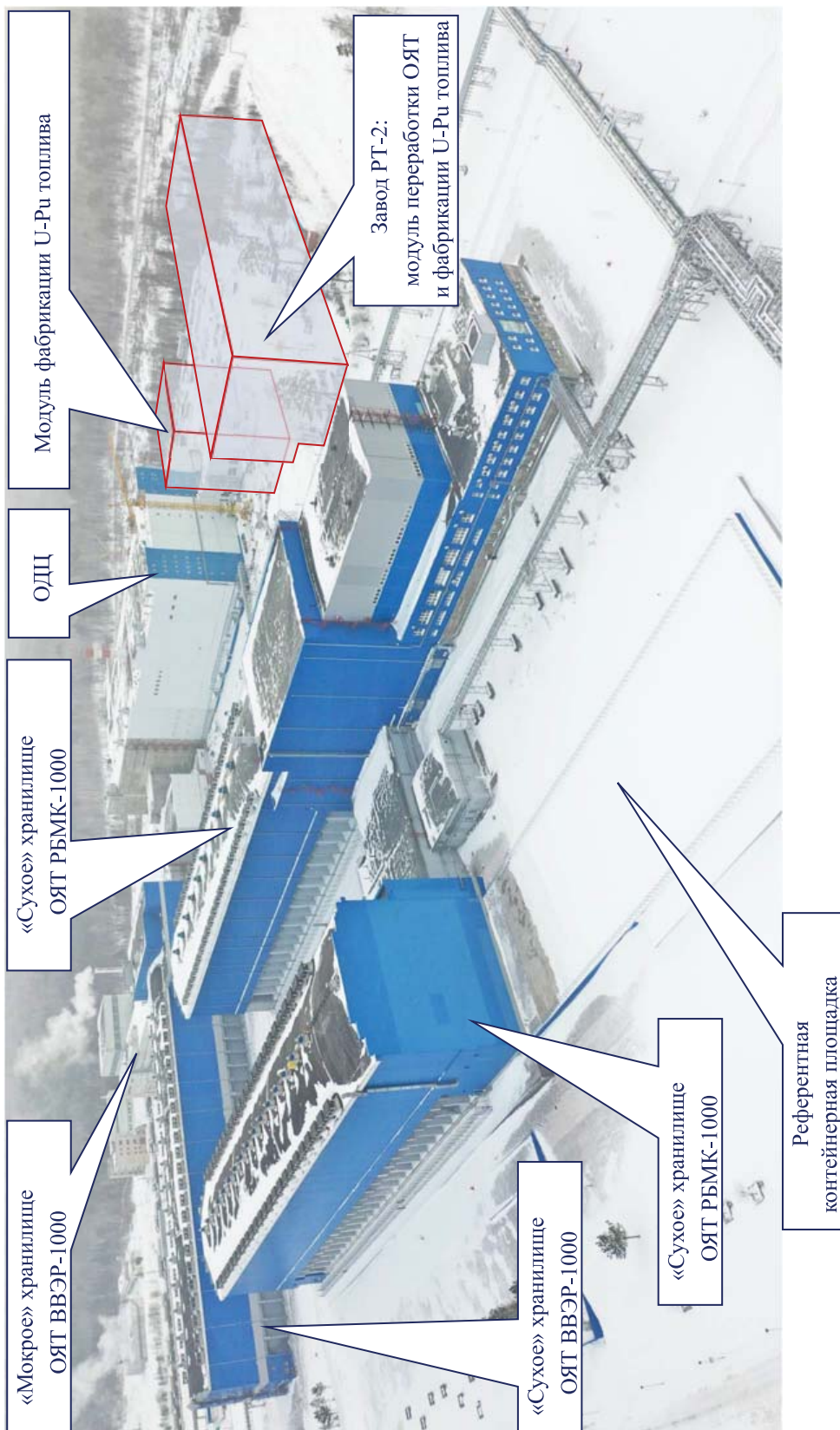


Рис. 8. Перспективный облик площадки ЗРТ ГХК.

ки ОЯТ и фабрикации уран-плутониевого топлива до утилизации минорных актинидов в российских РБН, направленный на поддержку устойчивого развития глобальной атомной энергетики и интеграцию услуг российских реакторов РБН в инфраструктуру мировой атомной энергетики...», состоят, прежде всего в существенном сокращении объемов глубинного захоронения в странах размещения АЭС (ключевая ценность для зарубежных заказчиков, по мнению разработчиков), устранении накопления плутония и минорных актинидов с достижением радиационной эквивалентности в глобальном масштабе.

Являются ли, в связи с этим, экспортно-ориентированные мощности по переработке зарубежного ОЯТ АЭС с фракционированием и отверждением короткоживущей фракции ВАО и завод(ы) по переработке накопленного российского ОЯТ производствами-аналогами? Очевидны различия как непосредственно стоящих перед производствами (для внешнего рынка и потребностей внутреннего рынка РФ) задач, так и, соответственно, в базовых требованиях к технологиям переработки, что требует четкой формализации таких требований при создании модулей переработки ОЯТ российских и зарубежных АЭС применительно к соотношению глубины переработки ОЯТ (с/без фракционирования) с соответствующими стоимостными и экологическими показателями.

2. С учетом дальнейшего обращения с уже накопленным объемом (более 6 тыс. т) отвержденных на ПО «Маяк» в алюмофосфатную стекломатрицу РАО, содержащих, в том числе, долгоживущие осколки деления и ядерные материалы, выполняемым работам по обоснованию безопасного захоронения и долгосрочного обеспечения безопасности боросиликатных стекол с включенными РАО применительно к задачам создания ПИЛ Нижнеканского массива, а также анализу применимости различных минералоподобных матриц для ВАО, остается открытым вопрос требований к матрицам для иммобилизации РАО от переработки ОЯТ.

Возможно ли при этом создание матрицы, отвечающей необходимым современным требованиям законодательства в части обеспечения безопасности и являющейся при этом промежуточным технологическим продуктом, что позволит в будущем принять решение либо об окончательном

ее отверждении/остекловывании, либо о ее переработке с целью извлечения необходимых компонентов? Приемлемы ли в части обращения с РАО (ВАО) отложенные решения или необходимо следовать по пути их окончательной иммобилизации? Применение указанного подхода позволит не только решить вопросы безопасного обращения с РАО, особенно на этапе предстоящего запуска новых радиохимических производств на ГХК и СХК, но и не обременять «наследием» будущие поколения атомщиков.

3. *Существует ли конкуренция в части технологий обращения с ОЯТ в РФ?* Реальной конкуренции между площадками трех комбинатов не существует с учетом вышеописанной сложившейся профильности и перспектив развития каждого из предприятий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет по разработке комплексной технологической схемы переработки ОЯТ на заводе РТ-2. Инв. № 43510/ДСП, 1992.
2. Приказ Госкорпорации «Росатом» от 05.12.2022 № 1/1618-П-дсп «Об утверждении Концепции обращения с отработавшим ядерным топливом Госкорпорации «Росатом» на 2023–2035 годы и перспективу до 2050 года и перечня целевых показателей и индикаторов мероприятий по обращению с отработавшим ядерным топливом».
3. Решение от 21.08.2022 № 1-8/27497-ВК о внесении изменений в базовую технологию опытно-демонстрационного центра (второго пускового комплекса) по переработке отработавшего ядерного топлива на основе инновационных технологий.
4. Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. Утверждена протоколом заседания Стратегического совета Госкорпорации «Росатом» от 11.04.2022 № 1-СС/14-Пр-дсп.