

ОБ ОСТЕКЛЫВАНИИ КУБОВОГО ОСТАТКА АЭС С ВВЭР-1200

В. Т. Сорокин¹, Е. И. Смола¹, И. Н. Скриган², Д. В. Рябков², В. А. Кащеев³, Д. Ю. Сунцов³

¹АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург

²АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», Санкт-Петербург

³АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара», Москва

Статья поступила в редакцию 23 января 2026 г.

В публикации представлены результаты краткого анализа существующих и перспективных технологий переработки и кондиционирования кубовых остатков (КО) на АЭС. Рассмотрены возможность и целесообразность использования технологии остекливания для отверждения КО АЭС, разрабатываемой для кондиционирования жидких радиоактивных отходов радиохимических производств. Статья подготовлена в развитие положений, изложенных в публикации [1].

Ключевые слова: радиоактивные отходы, кубовый остаток (КО), цементирование, ионоселективная сорбция, остекливание, кондиционирование, захоронение.

Проблема переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) атомной энергетики, несмотря на имеющиеся опыт и достижения, остается актуальной в связи с поставленной амбициозной задачей — обеспечить уменьшение объема кондиционированных твердых и отвержденных радиоактивных отходов (РАО), образующихся на АЭС с ВВЭР-1200, до уровня не более 45 м³ в год с одного блока [2]. Достижение этого показателя обеспечит технологическое лидерство в области обращения с эксплуатационными РАО атомных станций и повысит конкурентоспособность предприятий Госкорпорации «Росатом» на мировом рынке.

В международной и отечественной практике для переработки ЖРО применяется ряд технологий, анализ которых позволяет определить достоинства и недостатки каждой из них и быть фундаментом при выборе и обосновании реализации новых инновационных проектов обращения с отходами. Выбор технологии переработки

ЖРО зависит от их активности, солесодержания, химического и радионуклидного состава, а также от объема отходов и необходимой производительности оборудования.

ЖРО, образующиеся на АЭС (неорганизованные протечки, дренажи оборудования, регенераты, воды дезактивации), перед переработкой упариваются, как правило, до солесодержания 250—400 г/дм³ и в виде КО направляются на технологическую выдержку в систему промежуточного хранения для распада содержащихся в них короткоживущих радионуклидов.

На российских АЭС для их переработки применяется глубокое упаривание до солевого плава [3], ионоселективная очистка [4], а для отверждения концентратов КО — цементирование [5].

Используемые технологии различаются применяемым оборудованием, характеристиками конечных продуктов переработки и стоимостными показателями.

Метод глубокого упаривания КО до солевого плава наиболее простой и менее энергозатратный по сравнению с другими. Конечным продуктом является солевой плав влажностью до 40%, в котором содержатся нитраты, хлориды, сульфаты, бораты, оксалаты щелочных и редкоземельных элементов, в числе которых радионуклиды продуктов деления и коррозии. Высокая растворимость большинства солей КО, наличие комплексообразователей и поверхностно-активных веществ не позволяют рассматривать солевой плав в качестве конечной формы РАО для захоронения.

Технология ионоселективной очистки включает предварительное озонирование КО с целью разложения комплексонов и органических веществ, фильтрацию на мембранах, селективную сорбцию цезия на сорбенте термоксид-35 и глубокое упаривание раствора до солей. Ее конечными продуктами являются: фильтр-контейнеры с сорбентом, шлам, подлежащий цементированию, и солевой «не радиоактивный», хорошо растворимый плав, содержащий, помимо не сорбированных радионуклидов, также вредные химические вещества (нитраты, бораты и др.). В числе нерешенных вопросов данного метода — классификация конечных продуктов и подтверждение соответствия критериям приемлемости для захоронения.

Базовой технологией обращения с КО, принятой в проектах АЭС, является цементирование, она самая простая в аппаратном исполнении. Однако, проведение процесса требует учета многих физико-химических факторов для получения конечного продукта, отвечающего критериям приемлемости для захоронения. В числе наиболее важных: солесодержание КО, наличие тетраборатов, препятствующих гидратации цемента, и комплексообразователей, например, оксалатов. Известно, что оптимальным солесодержанием нитрата натрия в растворах, подвергаемых отверждению методом цементирования, считается 150–200 г/дм³. При отношении раствор/цемент, равном 0,65/0,50, объем цементного компаунда по отношению к раствору увеличится в 1,5–2,0 раза. При более высоком солесодержании увеличение объема еще более существенно [6].

Для регулирования времени схватывания и твердения цементной массы и повышения качества компаунда в раствор и в цемент вводят специальные добавки, которые повышают прочность и повышают водоустойчивость конечного продукта отверждения [7], [8].

Определяющим критерием выбора технологии переработки КО является обеспечение

радиационной безопасности при хранении, транспортировании и захоронении переработанных отходов и достижение минимальных суммарных затрат с учетом всех стадий обращения.

Рассмотренные выше методы переработки КО различаются трудно сравнимыми характеристиками конечных продуктов, которые не в полной мере отвечают критериям приемлемости для захоронения, также отсутствуют сопоставимые технико-экономические показатели для их сравнительного анализа.

Технология остекловывания

В качестве альтернативы существующим методам переработки КО может быть предложена технология остекловывания, которая используется, в основном, для отверждения жидких высокоактивных отходов (ВАО), образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Данная технология хорошо зарекомендовала себя при кондиционировании жидких ВАО. Известно также об остекловывании широкого спектра РАО на АЭС в Южной Корее [Kim C., Jo H., Jung J. KHNP Experiences with Cold Crucible Induction Melter // EM-30 Next Generation Melter Technology Workshop. Washington, D.C., USA, March 03–05, 2010. P. 1–48].

Применение данного метода привлекательно по следующим причинам:

- наименьший объем получаемого конечного продукта;
- высокая химическая стойкость стекол;
- высокая радиационная стойкость стекол;
- отсутствие в отвержденной форме воды, продуктов радиолиза, комплексообразователей, вредных химических веществ.

Технология остекловывания ЖРО заключается в максимальном концентрировании раствора упариванием, который затем со стеклообразующими добавками (стеклофриттой) направляется в плавитель, где происходит его окончательное обезвоживание, кальцинация (разложение солей с образованием оксидов) и сплавление оксидов отходов и стеклообразователей при температуре 1100–1200 °С. Это так называемый одностадийный процесс. Если в плавитель направляется кальцинат, представляющий собой смесь оксидов, полученных в результате высокотемпературной обработки солей РАО в кальцинаторе, то это двухстадийный процесс.

Расплавленная стекломасса сливается в контейнеры и после охлаждения направляется на хранение, а образующаяся при остекловывании парогазовая фаза поступает в систему газоочистки.

Таблица 1. Характеристики электропечей

Показатели печи	Тип печи				
	ЭП ФГУП «ПО Маяк»	ИПХТ АО НПФ «Сосны», СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», АО «Радиевый институт» (ФГУП «ГХК»)	ИПХТ, АО «ВНИИНМ» (АО «СХК»)	ИПГТ, АО «Радиевый институт» (АО «СХК»)	ИПГТК, АО «Радиевый институт» (ПРК)
Производительность по стеклу, кг/ч	15	12	До 7	До 7	2
Диаметр плавителя, мм	800 (без теплоизоляции)	630	300	250	200
Мощность, кВт	250	420	60	40	20
Частота, кГц	50 Гц	440	1760	10	66

Для варки стекла можно использовать переменный электрический ток промышленной частоты, протекающий через расплав, как правило, в керамическом плавителе, либо ток повышенной частоты в установках индукционной плавки в «холодном» тигле, или применяемый для нагрева металлического тигля с расплавом в «горячих» тигле и тигле-контейнере.

В табл. 1 представлены типы и характеристики печей, эксплуатируемых и разрабатываемых предприятиями отрасли, для остекловывания ЖРО, которые могут быть прототипами для установок остекловывания КО АЭС с ВВЭР-1200. Это электропечи прямого нагрева (ЭП), индукционные плавители с «холодным» тиглем (ИПХТ), индукционные плавители с «горячим» тиглем (ИПГТ) и индукционные плавители с «горячим» тиглем-контейнером (ИПГТК).

В качестве прототипа для остекловывания КО АЭС могут рассматриваться все создаваемые малогабаритные электропечи с производительностью от 2 до 15 кг/ч по стеклу.

Специалистами ФГУП «ПО «Маяк» разрабатывается эвакуируемый малогабаритный (по сравнению с ЭП-500) плавитель прямого нагрева

с донным сливом для остекловывания ВАО от переработки ОЯТ энергетических реакторов с получением боросиликатного стекла [9].

С учетом мощности и других характеристик плавителя, эту установку целесообразно рассматривать для остекловывания накопленных КО на АЭС, когда требуется высокая производительность, например, при выводе блоков из эксплуатации.

Решение о применении мощного плавителя с использованием прямого нагрева было принято на заводе в Хэнфорде (США), занимавшемся производством оружейного плутония для военных программ, где накоплено 212000 м³ смешанных РАО. После извлечения ¹³⁷Cs отходы относятся к низкоактивным (НАО), в которых основными доминирующими нуклидами являются ⁹⁹Tc и ¹²⁹I. Остеклованные РАО будут сливаться в контейнеры из нержавеющей стали диаметром 1,2 м, высотой 2,1 м, массой более 7 т, которые подлежат размещению в приповерхностном пункте захоронения отходов с изолирующим экраном на полигоне в центральной части комплекса «Хэнфорд». Ожидается, что в результате остекловывания НАО будет получено более 160000 м³ стекла [10].

Таблица 2. Характеристики возможных прототипов установки остекловывания кубового остатка АЭС с ВВЭР-1200 с использованием ИПХТ, ИПГТ и ИПГТК

Наименование	ИПХТ	ИПГТ	ИПГТК
Место размещения экспериментального образца установки	АО «ВНИИНМ», РХЗ АО «СХК»		АО «Радиевый институт», РХЗ АО «СХК»
Назначение установки	В АО «ВНИИНМ» – остекловывание различных имитаторов РАО (ж. и тв.) в том числе имитатора КО АЭС. В АО «СХК» – остекловывание реальных ЖРО САО	В АО «СХК» – остекловывание реальных ЖРО САО	Остекловывание имитаторов ВАО, экспериментальные исследования
Опыт эксплуатации установки	Опыт эксплуатации полномасштабного макета опытно-промышленной установки в АО «ВНИИНМ» с 2015 г. Установка остекловывания ЖРО с ИПХТ на РХЗ АО «СХК», созданная по проекту «Регенерат», переведена в статус промышленной в 2021 г.	Установка остекловывания ЖРО с ИПГТ на РХЗ АО «СХК», созданная по проекту «Регенерат», переведена в статус промышленной в 2021 г.	Опыт эксплуатации полномасштабного макета опытно-промышленной установки в АО «Радиевый институт» с 2021 г.
Уровень готовности технологии	TRL 9	TRL 9	TRL 6
Технология остекловывания и стекломатрица	Предварительная подготовка пасты на основе бентонитовой глины, метабората натрия и ЖРО. Либо смешение стеклофритты и ЖРО. Боросиликатное стекло	Смешение в печи стеклофритты и ЖРО. Боросиликатное стекло	

Для отверждения КО АЭС наиболее целесообразно использование электропечей с индукционным нагревом, характеризующихся приемлемыми габаритными размерами и производительностью.

Характеристики возможных прототипов установки остекловывания КО АЭС представлены в табл. 2.

Рассмотрим более подробно установки остекловывания с различными типами плавителей.

Исследования по остекловыванию ЖРО в индукционном плавителе с «холодным» тиглем проводятся в АО «ВНИИНМ» более 30 лет. В рамках проектного направления «Прорыв» создан полномасштабный макет опытно-промышленной установки остекловывания жидких ВАО от переработки ОЯТ, на котором изучены вопросы дистанционной замены ее отдельных узлов, включая элементы контроля и управления (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид установки остекловывания ЖРО с ИПХТ

Принципиальная схема установки, которая может быть использована для остекловывания КО АЭС с ВВЭР-1200, изображена на рис. 2.

ЖРО с содержанием 400 г/дм^3 подаются из монжуса (1) в обогреваемый смеситель шихты (5), в который также поступают компоненты жидкого и твердого флюса. В качестве последнего используется порошок бентонита, а первого — раствор тетрабората натрия. Бентонит из бункера (2) подается шнековым дозатором (3), жидкий флюс — из мерника (4). В обогреваемом смесителе происходят смешение продуктов и испарение избыточной влаги с получением пастообразной смеси (стеклообразователя), которая эксцентрическим шнековым дозатором (7) подается в плавитель ИПХТ (9). Парогазовая фаза из обогреваемого

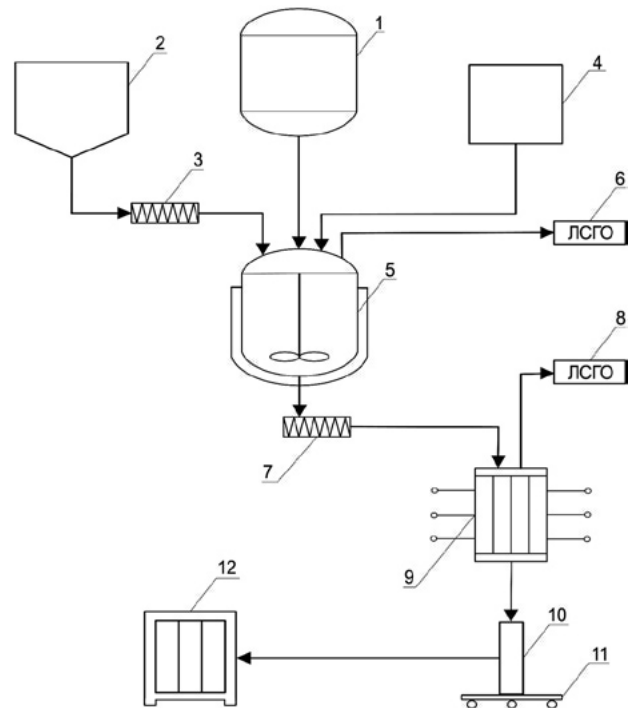


Рис. 2. Принципиальная аппаратная схема установки остекловывания ЖРО с ИПХТ

смесителя направляется в локальную систему газоочистки (6). В индукционном плавителе происходят окончательное обезвреживание смеси, разложение солей до оксидов и сплавление оксидов в стекломассу. Образующийся расплав стекла, содержащий радионуклиды, периодически сливается в специальные металлические бидоны (10). После охлаждения стекломассы бидоны с помощью транспортной системы (11) направляются на комплектацию контейнеров НЗК (12) и на временное хранение. Образующаяся парогазовая фаза из плавителя поступает в локальную систему газоочистки (8).

«Холодный» тигель представляет собой устройство, состоящее из отдельных водоохлаждаемых металлических элементов (секций), с помощью которых формируется объем, в котором осуществляются нагрев и расплавление оксидов отходов и стеклообразователя. Индуктор охватывает «холодный» тигель вместе с находящейся в нем загрузкой, создавая высокочастотное электромагнитное поле внутри него. Блок генератора выполняет функцию преобразователя электрической энергии с промышленной частоты в 50 Гц в $(1,76 \pm 0,044) \text{ МГц}$.

На рис. 3 представлена балансовая схема установки ИПХТ из расчета объема КО $25 \text{ м}^3/\text{год}$ с содержанием 400 г/дм^3 при использовании бентонита в качестве флюса.

При принятых условиях расчета, объем остеклованных отходов в 4 раза меньше объема КО.

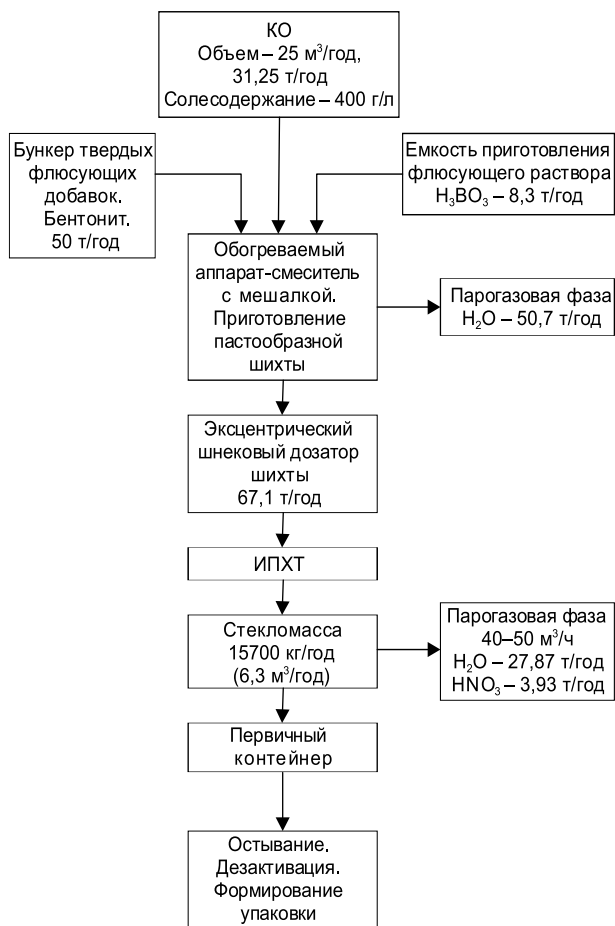


Рис. 3. Балансовая схема установки ИПХТ

Таблица 3. Технические характеристики установки остекловывания КО АЭС с ИПХТ

Наименование	Показатель
Опыт эксплуатации установки (в экспериментальном режиме)	3 года
Производительность экспериментального образца установки по раствору, л/ч	1,93–2,5
Производительность экспериментального образца установки по стекломассе, кг/ч	5–7
Расход электроэнергии на получение 1 кг стекломассы, кВт·ч	6–8
Параметры стекломатрицы	Боросиликатное стекло: оксиды ЖРО АЭС – 30 % мас.; бентонит – 60 % мас.; V ₂ O ₅ – 10 % мас. Плотность – 2,6 кг/м ³ . Радионуклидный состав стекла: ¹³⁷ Cs ~ 97,5 %, ⁶⁰ Co ~ 2 %, другие радионуклиды ~ 1 %
Уносы радионуклидов из электропечи (испарителя) по основным радионуклидам	Cs ₂ O ~ 0,1–1,3 % мас.; V ₂ O ₅ ~ до 1 % мас.
Количество модулей установки, необходимых для остекловывания 25 м ³ /год соледержанием 400 г/л	1

Технические характеристики установки остекловывания с ИПХТ представлены в табл. 3.

В АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» в период с 2016 по 2019 г. разработана и проверена технология и экспериментальное оборудование для остекловывания ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000 по базовой технологии ОДЦ ФГУП «ГХК». Процесс осуществляется в печи ИПХТ по одностадийной технологии при дозировании в печь стеклообразующих компонентов в виде стеклянной крошки (стеклофритты) и упаренного раствора ЖРО. В настоящий момент опытно-промышленный образец данной установки проходит пусковые испытания на ОДЦ ФГУП «ГХК».

Для остекловывания ЖРО от переработки регенерированного урана в 2019 году на Радиохимическом заводе АО «СХК» создан узел остекловывания с использованием индукционной печи с «горячим» тиглем (ИПГТ). Узел остекловывания с печью ИПГТ предназначен для работы в непрерывном режиме по одностадийной технологии остекловывания и периодическим сливом расплава в бидон. В 2024 году работоспособность узла плавления с печью ИПГТ проверена на реальных растворах ЖРО, после чего она была введена в опытно-промышленную эксплуатацию.

С 2021 года в рамках федерального проекта по созданию полифункционального радиохимического комплекса Радиевым институтом проводились работы по разработке и испытаниям макета установки остекловывания ЖРО индукционной плавкой в «горячем» тигле-контейнере (ИПГТК) (рис. 4).

Установка создавалась для эксплуатации в унифицированном технологическом модуле, является компактной и предназначена для остекловывания относительно небольшого объема ЖРО (до 10 м³/год) и является аналогом установки, ранее созданной в АО ГНЦ «НИИАР» [11], [12].



Рис. 4. Внешний вид макета установки остекловывания ЖРО на базе ИПГТК

Основные отличия заключаются в методе нагрева тигля-контейнера (индукционный нагрев вместо резистивного), составе локальной системы газоочистки и наличии предварительной стадии концентрирования ЖРО в тонкопленочном роторном концентраторе (ТРК). В данной установке также используется одностадийный процесс, однако, в отличие от рассмотренных выше, остекловывание происходит в периодическом режиме из-за необходимости замены тигля-контейнера с наработанным стеклом. Подобная технология в настоящее время активно развивается во Франции для остекловывания РАО сложного состава [13]. С учетом имеющихся у нее основных преимуществ в виде портативной модульной компоновки, отсутствия как таковой операции слива стекла, а также возможности полной автоматизации процесса, она может быть рассмотрена для использования в качестве базовой для остекловывания КО АЭС.

Принципиальная аппаратная схема установки на базе ИПГТК представлена на рис. 5. Основная технологическая часть состоит из буферной емкости-дозатора для подачи ЖРО в ТРК дозирующего устройства для стеклофритты, электропечи и аппаратов локальной системы газоочистки (ЛСГО).

Установка работает следующим образом. В буферную емкость, нагретую до температуры 80 °С, подаются ЖРО. Она находится под разрежением и барботируется сжатым воздухом

для исключения образования осадков на дне аппарата. Из буферной емкости ЖРО сжатым воздухом подаются в выведенный на рабочий режим ТРК, представляющий собой вертикальный аппарат роторного типа с распределительной тарелкой и лопатками, приводимыми во вращение электродвигателем. Корпус ТРК обогревается до температуры около 180 °С. Между ним и лопатками ротора имеется зазор (1,0±0,2) мм, в котором происходят турбулизация подаваемых жидких ВАО, их упаривание и стекание в печь остекловывания.

В основе технологического процесса лежит печь индукционной плавки в горячем тигле-контейнере с жидкой подачей упаренных ЖРО. Нагрев тигля осуществляется до температуры 1000–1100 °С индуцированными токами средней частоты. Подача упаренных ЖРО в печь осуществляется непрерывно, а стеклообразующих добавок в виде предварительно изготовленной стеклофритты с размером гранул 1–3 мм — периодически, посредством взвешивающего дозатора с системой газонепроницаемых шлюзовых затворов. Остекловывание ЖРО производится непрерывно на поверхности ванны стекломассы. К основным технологическим шагам при данном процессе относятся доупаривание и сушка отходов, перевод солевого сухого остатка в оксиды и их химическая реакция со стеклофриттой с получением конечного стеклопродукта — боросиликатного стекла.

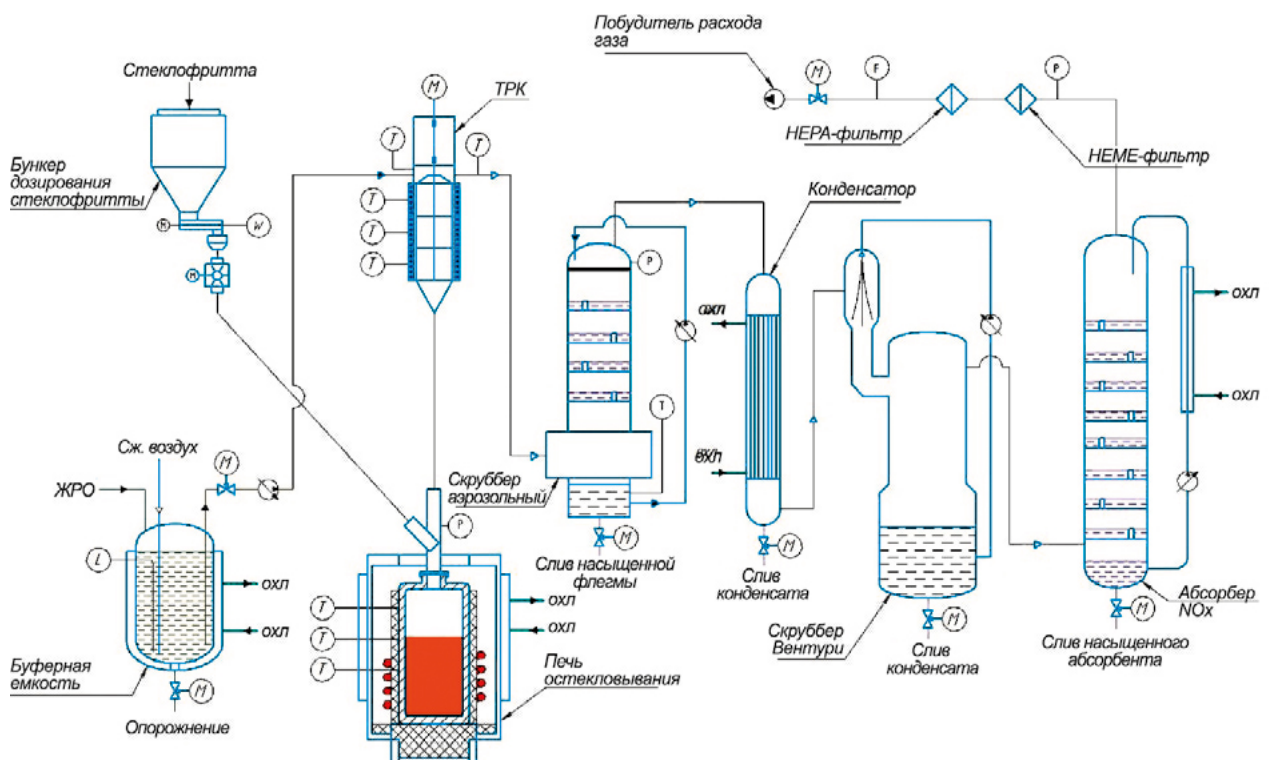


Рис. 5. Принципиальная аппаратная схема установки остекловывания ЖРО на базе ИПГТК

Затем тигель-контейнер остужается в печи естественным образом. После охлаждения до температуры менее 100 °С он извлекается и направляется на герметизацию и паспортизацию РАО, а в печь подается новый тигель.

Образующиеся в процессе упаривания и остекловывания ЖРО отходящие газы поступают в локальную систему газоочистки. В их состав помимо водяного пара входят также окислы азота, продувочный воздух, летучие соединения продуктов деления (такие как цезий, технеций, йод, рутений и т. д.), жидкие и твердые аэрозоли, а также воздух утечек. Необходимое разрежение в печи создается путем регулировки производительности вентилятора отходящих газов. ЛСГО представляет собой многоступенчатую систему мокрой очистки с последующим сухим фильтрованием. Ее производительность в текущем исполнении составляет до 10 м³/ч по парогазовой фазе.

В состав ЛСГО входит аэрозольный скруббер, конденсатор, скруббер Вентури и абсорбер кислых газов. Аэрозольный скруббер эксплуатируется при достаточно высокой температуре флегмы, равной 85 °С, с целью предотвращения преждевременной конденсации водяного пара. Через определенные промежутки времени часть промывочной жидкости путем рециркуляции подается в буферную емкость и таким образом направляется обратно в технологический процесс. Ее возвращенное количество возмещается за счет целенаправленной конденсации водяного пара, содержащегося в отходящих газах плавителя. Для этого температура промывочной жидкости в аэрозольном скруббере временно понижается на 5–15 °С. Он улавливает в основном частицы размером более 10 мкм, а также большую часть летучих соединений. В конденсаторе осуществляется максимально возможная конденсация водяного пара, содержащегося в отходящих газах. На следующей ступени очистки, в скруббере Вентури, улавливаются более мелкие частицы и аэрозоли размером от не более 3 мкм до не менее 0,5 мкм. После этого газовый поток проходит через абсорбер кислых газов для доочистки. С помощью водяного охладителя температура промывочной жидкости в контуре ее циркуляции поддерживается на уровне не более 15 °С в целях обеспечения оптимальной абсорбции окислов азота. Далее отходящий газ доочищается в системе сухого фильтрования.

Конденсат из конденсатора, а также вторичные ЖРО, образующиеся при периодической замене части промывочной жидкости скруббера Вентури и абсорбера кислых газов,

направляются в сборную емкость для последующего упаривания (узел упаривания в рассматриваемой схеме отсутствует). Кубовый остаток после этого путем рециркуляции возвращается в буферную емкость печи остекловывания. Образующийся дистиллят, представляющий собой НАО, отправляется на дальнейшую переработку.

В табл. 4 представлены характеристики макета установки остекловывания ЖРО на базе ИПГТК.

Таблица 4. Характеристики макета установки остекловывания ЖРО на базе ИПГТК

Наименование	Показатель
Опыт эксплуатации установки (в экспериментальном режиме)	3 года
Производительность экспериментального образца установки по раствору, л/ч	до 3
Производительность экспериментального образца установки по стекломассе, кг/ч	2
Расход электроэнергии на получение 1 кг стекломассы кВт·ч	5
Характеристика стекломатрицы	Боросиликатное стекло, 2 600 кг/м ³
Уносы основных элементов ЖРО из электропечи и ТРК (все элементы улавливаются в ЛСГО и возвращаются на остекловывание)	Sr – 2,5 %, Cs ₂ O – 7,5 %, Na – 5,5 %
Количество модулей установки, необходимых для остекловывания 25 м ³ /год КО с содержанием 400 г/л	2

Накопленный опыт эксплуатации рассмотренных опытно-промышленных установок открывает перспективу их применения для остекловывания жидких отходов других объектов использования атомной энергии, включая АЭС.

Сравнение принципиальных схем установок остекловывания с использованием различных индукционных плавителей показывает, что они различаются аппаратами остекловывания, способом введения стеклообразователей и, возможно, системой газоочистки. Данные по технологическим и технико-экономическим различиям рассмотренных типов оборудования, применительно к условиям остекловывания КО АЭС, можно получить на имеющихся стендах при остекловывании имитатора ЖРО и при выполнении технико-экономических исследований, когда будут разработаны компоновочные решения по размещению основного и вспомогательного оборудования, проведены расчеты материальных балансов, расходы реагентов и энергетики и установлены технико-экономические показатели, включая затраты на кондиционирование, хранение, транспортирование и захоронение упаковок с остеклованными отходами.

Проектная оценка использования технологии остекловывания КО АЭС

При рассмотрении технологии остекловывания КО применительно к проекту АЭС-2006, аналогичному Ленинградской АЭС-2, принято, что при нормальной эксплуатации ее энергоблока ожидается образование примерно $25 \text{ м}^3/\text{год}$ кубового остатка с содержанием около $400 \text{ г}/\text{дм}^3$, что составляет 10 т солей, включающих в основном нитрат натрия (табл. 5) [1].

Таблица 5. Расчетный среднегодовой качественный состав КО

Компонент	Концентрация, $\text{г}/\text{дм}^3$
BO_3^{3-}	8,083
K^+	5,389
NH_4^+	$2 \cdot 10^{-3}$
NO_3^-	65,975
MnO_2	6,699
Cl^-	$0,13 \cdot 10^{-3}$
$\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	8,738
CO_3^{2-}	79,374
Сульфонол	0,874
ГМФН	2,039
Na^+	222,829
Общее	$\sim 400,0$

Максимальная активность кубового остатка может достигать $5 \cdot 10^8 \text{ Бк}/\text{дм}^3$. Радионуклидный состав: $^{137}\text{Cs} \sim 97,5\%$, $^{60}\text{Co} \sim 2\%$, другие — менее 1%.

Одна из возможных принципиальных схем процесса остекловывания КО представлена на рис. 6. Исходный КО выпарных установок системы переработки трапных вод (1) после технологической выдержки в баках системы промежуточного хранения ЖРО подается по обогреваемому трубопроводу в ТРК, где концентрируется до содержания солей $1000 \text{ г}/\text{л}$. Парогазовая фаза ТРК (5) поступает в барботер-холодильник ТРК (БХ ТРК). Конденсат БХ ТРК (6) направляется на орошение в абсорбционную колонну и частично используется в качестве его флегмы, а газовая фаза (7) направляется в систему газоочистки. Концентрированный КО (2) совместно со стеклофриттой (3) направляется в печь остекловывания, в которой при температуре $1100\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ происходят его окончательное обезвоживание, кальцинация солей и их сплавление.

Расплавленная стекломасса (4), при использовании ИПХТ или ИПГТ, сливается в контейнеры и после охлаждения направляется на формирование упаковки, отвечающей критериям приемлемости для хранения, транспортирования и захоронения. При использовании ИПГТК тигель является контейнером, который рассматривается как первичная упаковка для остеклованных РАО.

Образующаяся в процессе остекловывания парогазовая фаза (8) поступает в барботер-холодильник печи остекловывания (БХ ПО), конденсат которого (9) направляется на упаривание в ТРК совместно с исходным КО (или возвращается в бак трапных вод для снижения нагрузки на роторный испаритель) и частично используется в качестве его флегмы. Газовая фаза (10) поступает в систему газоочистки. Система газоочистки

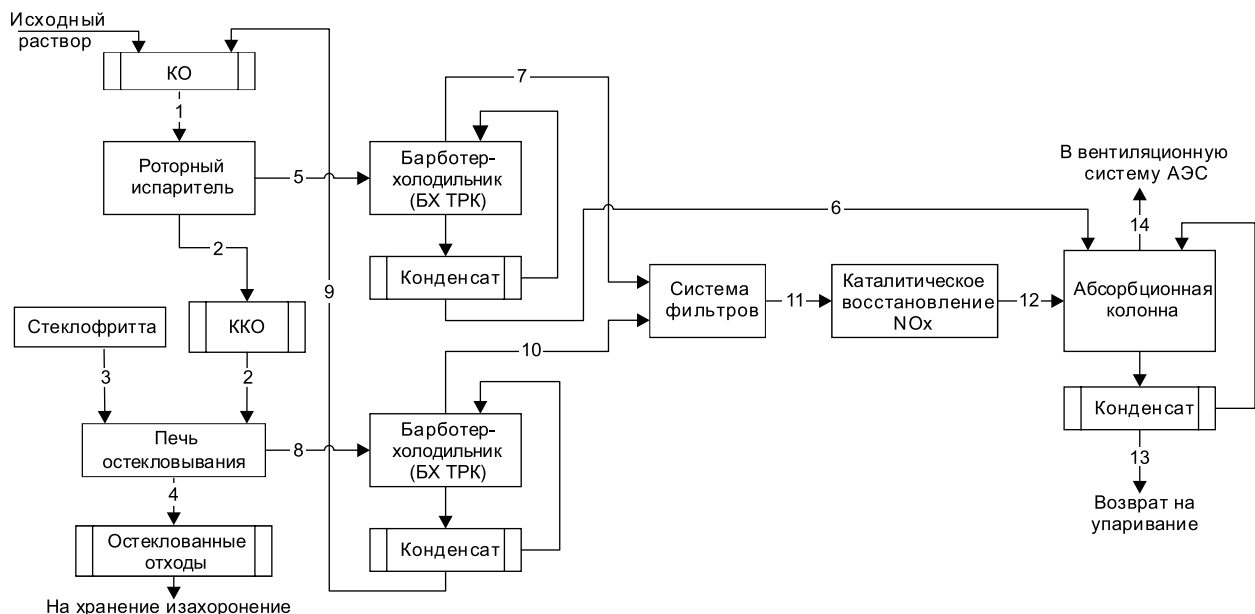


Рис. 6. Принципиальная блок-схема процесса остекловывания КО

потоков (7) и (10) включает систему самоочищающихся фильтров грубой и тонкой очистки, аппарат каталитического восстановления оксидов азота и абсорбционную колонну для улавливания их остаточного количества. Практически чистый раствор (13) направляется в контрольные баки системы переработки трапных вод или в систему спецканализации. Очищенный воздух (14) выбрасывается в вентиляционную систему АЭС.

По предварительным расчетам, при остекловывании 25 м³ КО с содержанием 400 кг/м³ и использованием стеклофритты или бентонита образуется примерно 6,5–10,0 м³ стекломассы с активностью (5,0–7,7)·10⁵ Бк/г, что соответствует классу 3 по классификации РАО для захоронения (Постановление Правительства РФ № 1069).

Таким образом, в результате использования технологии остекловывания КО АЭС с ВВЭР-1200 образуются:

- остеклованные отходы (уменьшение исходного объема КО в 2,5–4,0 раза);
- очищенный бессолевым раствор (возможно, слабый раствор азотной кислоты, концентрация которой будет зависеть от эффективности каталитического восстановления оксидов азота), который может сбрасываться в контрольные баки системы переработки трапных вод или в систему спецканализации;
- очищенный ниже значений предельно допустимых выбросов воздух.

Формирование упаковок остеклованных отходов

Критериями выбора контейнеров для формирования упаковок остеклованных РАО АЭС являются:

- максимальное использование их объема;
- соблюдение требований к упаковкам 3 класса по радиоактивному содержанию в соответствии с НП-093-14, что позволит захоранивать

их в наиболее простых приповерхностных пунктах захоронения;

- соблюдение требований к упаковкам типа А по НП-053-14, что даст возможность перевозить их на хранение и захоронение без специальных транспортных контейнеров.

Первичными упаковками для слива стекломассы из индукционных плавителей могут быть, по предложению АО «ВНИИНМ», металлические емкости (бидоны или ящики) с размерами, учитывающими тип и габариты контейнера для захоронения (рис. 8).

На установках ИПГТК целесообразнее использовать цилиндрические или эллиптические бидоны с ограниченными габаритами, определяемыми особенностями индукционного нагрева.

Для формирования упаковок с остеклованными отходами АЭС могут применяться сертифицированные контейнеры типа НЗК и КРАД-1,36, характеристики которых представлены в табл. 6.

Расчеты выполнены для объема остеклованных отходов 10 м³. Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие предварительные выводы.

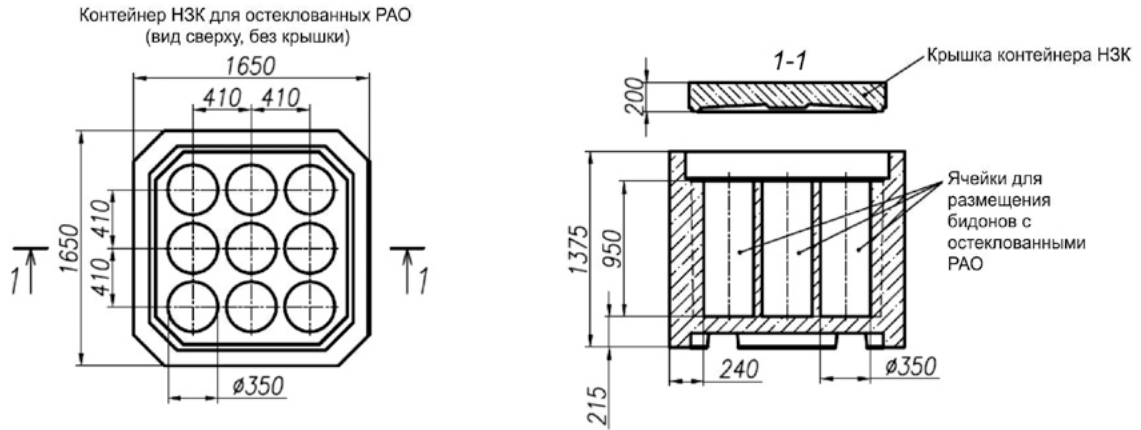
Очевидно, что при размещении прямоугольных упаковок коэффициент использования объема контейнера будет наиболее высоким. Это также относится и к внешнему объему упаковок, от которого зависит стоимость услуг по захоронению.

В отношении тиглей-контейнеров можно сказать, что, несмотря на низкий коэффициент использования их объема (0,38), наиболее оптимальным вариантом является использование контейнера КРАД-1,36 для тигля диаметром 200 мм.

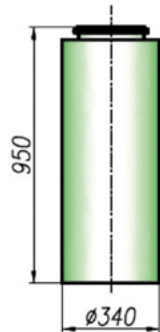
Радиоактивное содержимое для всех случаев формирования упаковки с остеклованными отходами не превысит 2 ТБк на упаковку в расчете на ¹³⁷Cs.

Таблица 6. Характеристика упаковок с использованием контейнеров типа НЗК и КРАД-1,36

Габариты первичной упаковки, мм	Объем стекла, дм ³	Количество упаковок в контейнере, шт.	Объем стекла в контейнере, м ³ (K _{но})	Количество контейнеров, шт.	Внешний объем контейнеров, м ³	Радиоактивное содержимое, Бк
НЗК						
440×440×850	160	9	1,44 (0,96)	6,9	25,7	1,8·10 ¹²
Д-200, Н-850	26	36	0,94 (0,55)	10,6	39,0	1,2·10 ¹²
Д-300, Н-850	57	16	0,91 (0,53)	11,0	40,3	1,1·10 ¹²
КРАД-1,36						
300×300×850	72	16	1,14 (0,76)	8,8	16,5	1,4·10 ¹²
Д-200, Н-850	26	25	0,65 (0,38)	15,4	29,0	0,8·10 ¹²
Д-300, Н-850	57	16	0,91(0,53)	11,0	40,3	1,1·10 ¹²



Бидон для остеклованных РАО
(увеличено)



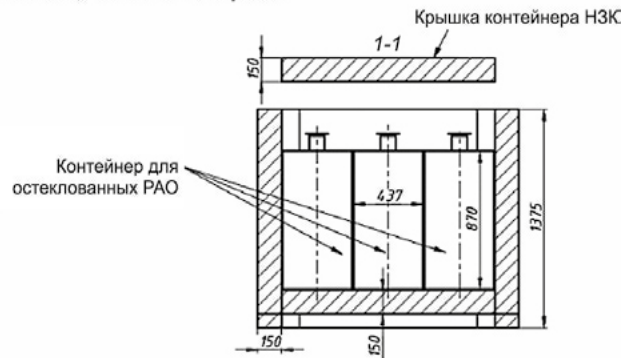
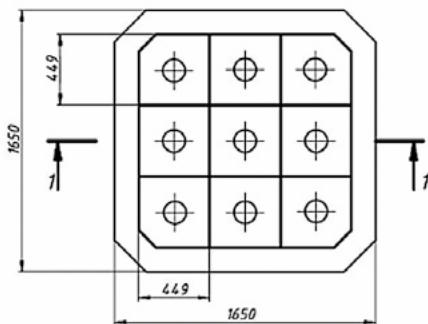
Контейнер НЗК с остеклованными РАО
(вид в разрезе, без крышки)



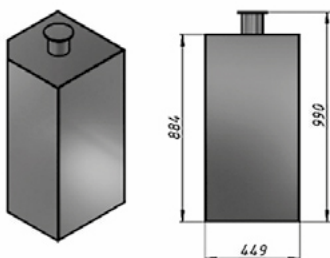
Рис. 7. Формирование упаковок с цилиндрическими контейнерами

Упаковка НЗК-150-1,5П с контейнерами

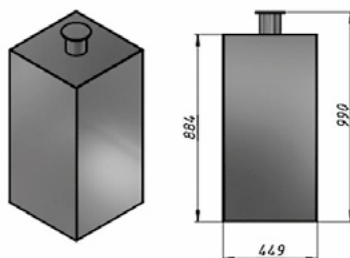
Контейнер НЗК для остеклованных РАО (вид сверху, без крышки)
(М 1:20)



Угловой контейнер под НЗК
(М 1:15)



Контейнер под НЗК
(М 1:15)



Контейнер НЗК с остеклованными РАО
(вид без крышки)

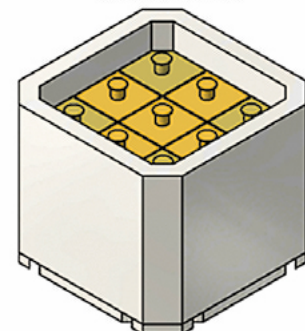


Рис. 8. Формирование упаковок с прямоугольными контейнерами

Примеры их формирования показаны на рис. 7 и 8.

В табл. 7 представлено предварительное сравнение основных показателей рассмотренных методов переработки КО применительно к его проектному исходному объему, образующемуся на энергоблоке АЭС с ВВЭР-1200 (25 м³/год КО с содержанием около 400 г/дм³).

Таблица 7. Основные показатели¹⁾ методов переработки КО АЭС с ВВЭР-1200

Показатели	Метод отверждения	
	Цементирование	Остекловывание
Характеристика формы: Выщелачиваемость, г/см ² ·сут	1·10 ⁻³	1·10 ⁻⁶
Плотность, г/см ³	1,8	2,5
Радиационная стойкость, Гр	1·10 ⁶	1·10 ⁸
Объем отвержденных отходов, м ³ /год	32,5 ²⁾	6,2–10,0
Изменение объема отходов, раз ³⁾	Увеличение в 1,3	Уменьшение в 2,5–4,0
Количество упаковок, шт.	25 НЗК ⁴⁾	7–11 НЗК
Внешний объем упаковок, м ³ /год	92,5	25,9–40,7
Стоимость контейнеров, млн руб. (консервативно принято 1 ед. – 300 тыс. руб.)	7,5	2,1–3,3
Стоимость захоронения РАО, млн руб. (тарифы НО РАО на захоронение РАО 3 класса на 2025 г.)	18,45	5,16–8,12
Стоимость транспортировки РАО в ПЗРО НО РАО, млн руб. (принято 10 % от стоимости захоронения)	1,84	0,51–0,81
Общая стоимость обращения с отвержденными ЖРО ⁵⁾ , млн руб.	27,79	7,77–12,23

¹⁾ Показатели таблицы должны быть уточнены при выполнении специального технико-экономического исследования методов обращения с КО.

²⁾ Объем цементного компаунда определен при увеличении объема КО в 1,3 раза.

³⁾ Изменение определено по отношению к исходному объему КО.

⁴⁾ Количество упаковок определено с учетом размещения цементного компаунда в НЗК с металлической вставкой без использования бочек.

⁵⁾ Не учтена стоимость эксплуатационных расходов (электроэнергия, рабочие среды, материалы, трудозатраты), которые, по экспертной оценке, для технологий цементирования и остекловывания могут быть сопоставимы.

Предварительное сравнение двух технологий отверждения КО АЭС показывает, что внедрение технологии остекловывания позволит получить объем отходов в 3–5 раз меньше, чем цементного компаунда. За счет этого затраты на контейнеры, стоимость захоронения и транспортирования можно сократить на 15–20 млн руб. в год. Уточнение технико-экономических показателей можно выполнить на стадии проектной проработки.

Заключение

В настоящее время для остекловывания ВАО радиохимических предприятий отрасли (АО «СХК», АО «ГХК», ФГУП «ПО «Маяк») создается и эксплуатируется ряд установок остекловывания, различающихся методом нагрева, производительностью, состоянием готовности.

Имеющиеся установки могут быть адаптированы для остекловывания КО АЭС, активность которых в десятки-сотни тысяч раз ниже ВАО от переработки ОЯТ. Учитывая линейку производительности, они могут быть использованы как для АЭС большой, так и для станций средней и малой мощности.

Целесообразность и необходимость (привлекательность) применения технологии остекловывания КО АЭС состоит в том, что:

- в результате высокотемпературного процесса достигается минимальный объем отвержденных отходов в виде стеклоподобного компаунда;
- отвержденная форма отходов характеризуется отсутствием воды, комплексообразователей и вредных химических веществ, обладает высокой химической и радиационной стойкостью, что в наивысшей степени отвечает всем критериям приемлемости отходов для захоронения;
- унос радионуклидов из плавителей составляет не более нескольких процентов, которые эффективно улавливаются локальной системой газоочистки;
- образующиеся в процессе газоочистки жидкие малосолевые растворы возвращаются в баки трапных вод для повторного упаривания, что говорит об отсутствии вторичных ЖРО;
- незначительное количество «сухих» фильтров не вносит существенного вклада в суммарное количество твердых РАО АЭС;
- технология переработки КО в электропечах позволяет перерабатывать шламы и пульпы, а также продукты переработки отработавших ионообменных смол (ОИОС) методом термической деструкции (СВЧ-деструкции) без создания специальных установок отверждения;
- малогабаритное оборудование установки остекловывания позволяет использовать модульный принцип при проектировании, изготовлении и поставки оборудования на АЭС;
- вопросы очистки газообразных отходов от оксидов азота каталитическим восстановлением до азота или получение раствора азотной кислоты абсорбцией для повторного использования, так же как и проблемы экономической эффективности остекловывания КО с учетом всех стадий, включая кондиционирование,

хранение, транспортирование и захоронение, могут быть решены на стадии технико-экономических исследований.

Литература

1. Сорокин В. Т., Павлов Д. И., Кащеев В. А., Мусатов Н. Д., Баринов А. С. Научные и проектные аспекты остекловывания жидких радиоактивных отходов АЭС с ВВЭР-1200 // Радиоактивные отходы. 2020. № 2 (11). С. 56–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-56-65.
2. Комплексная программа НИОКР «По разработке малоотходных технологий переработки и кондиционирования ЖРО для обеспечения целевых показателей в части сокращения удельных объемов радиоактивных отходов», № 9/02/133-пм от 27.01.2023.
3. Волков А. С., Наливайко Е. М. Обращение с радиоактивными отходами на блоке №1 Нововоронежской АЭС-2 проекта АЭС-2006 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 183–194. DOI: 10.26583/npe.2017.3.17.
4. Авезниязов С. Р., Стахов М. Р. Опыт работы по обращению с ЖРО на Кольской АЭС // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 49–54.
5. Захарова К. П., Химченко О. М., Суханов Л. П. и др. Разработка технологического режима цементирования солевых концентратов Волгоградской АЭС // Атомная энергия. 2007. Т. 103. № 5. С. 309–314.
6. Соболев И. А., Хомчик Л. М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
7. Горбунова О. А., Камаева Т. С. Физические и химические способы регулирования свойств цементных компаундов с боросодержащими жидкими радиоактивными отходами // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 1. С. 69–76.
8. Варлаков А. П. Научное обоснование унифицированной технологии цементирования радиоактивных отходов: дис... докт. техн. наук. — М.: ГУП МосНПО «Радон», 2011. 325 с.
9. Ремизов М. Б., Мелентьев А. Б., Шайдуллин С. М., Вербицкий К. В., Козлов П. В., Бендасов Д. И. Разработка и испытания эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого джоулевого нагрева дизайна ФГУП «ПО «Маяк» для отверждения ЖРО от переработки ОЯТ в боросиликатное стекло в рамках создания нового комплекса остекловывания ВАО // Радиоактивные отходы. 2024. № 1 (26). С. 35–46. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-1-35-46.
10. Marcial J. et al. Hanford low-activity waste vitrification: A review // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 461. P. 132437. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132437.
11. Кузин М. А. и др. Концепция модульного узла остекловывания высокоактивных отходов // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». 2017. № 1. С. 57–62.
12. Елисеев К. В., Дмитриева О. С., Безднякова Е. А. и др. Получение крупномасштабного образца боросиликатного стекла в узле остекловывания для полифункционального радиохимического исследовательского комплекса // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». 2023. № 2. С. 57–64.
13. Ladirat Ch. Overview on French Vitrification Processes // Joint ICTP-IAEA International School on Nuclear Waste Vitrification. 23–27 September 2019, Trieste, Italy.

Информация об авторах

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, эксперт главного технологического отдела по технологической части, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82, лит. А), e-mail: vsorokin@spbaer.ru.

Смола Евгений Иванович, эксперт, АО «Атомэнергопроект» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 55), e-mail: esmola@yandex.ru.

Скриган Илья Николаевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории технологии и процессов отверждения радиоактивных отходов, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр-кт, д. 28), e-mail: ilya.skriган@khlopin.ru.

Рябков Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке, АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» (194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр-кт, д. 28), e-mail: dryabkov@khlopin.ru.

Кащеев Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, директор отделения, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: ppp@bochvar.ru.

Сунцов Дмитрий Юрьевич, начальник отдела, АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт им. академика А. А. Бочвара» (123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а), e-mail: DYSuntsov@bochvar.ru.

Библиографическое описание статьи

Сорокин В. Т., Смола Е. И., Скриган И. Н., Рябков Д. В., Кащеев В. А., Сунцов Д. Ю. Об остекловывании кубового остатка АЭС с ВВЭР-1200 // Радиоактивные отходы. 2026. №1 (34). С. 32–45. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-32-45.

ON THE VITRIFICATION OF STILL BOTTOMS FROM NPPS WITH WWER-1200 REACTOR UNITS

Sorokin V. T.¹, Smola E. I.¹, Skrigan I. N.², Ryabkov D. V.², Kashcheev V. A.³, Suntsov D. Yu.³

¹JSC Atomenergoproekt, Saint-Petersburg, Russia

²JSC “V. G. Khlopin Radium Institute”, St. Petersburg, Russia

³JSC “Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar”, Moscow, Russia

Article received on January 23, 2026

This paper briefly analyses existing and prospective methods for still bottom (SB) processing and conditioning at NPPs. It explores the feasibility and advisability of a vitrification method proposed for the solidification of SB from NPPs, which is now being developed to provide conditioning of liquid radioactive waste from radiochemical production. This article builds on the concepts outlined in [1].

Keywords: radioactive waste, bottom residue, cementation, ion-selective sorption, vitrification, conditioning, disposal.

References

1. Sorokin V. T., Pavlov D. I., Kashcheev V. A., Musatov N. D., Barinov A. S. Nauchnyye i proyektnyye aspekty osteklovyvaniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov AES s VVER-1200 [Scientific and Design Aspects of Liquid Radioactive Waste Vitrification from Nuclear Power Plants with WWER-1200 Reactor Units]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 2 (11), pp. 56–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-56-65.

2. *Kompleksnaya programma NIOKR “Po razrabotke malootkhodnykh tekhnologiy pererabotki i konditsionirovaniya ZHRO dlya obespecheniya tselevykh pokazateley v chasti sokrashcheniya udel'nykh ob'yemov radioaktivnykh otkhodov* [Comprehensive R&D Program on the Development of Low-Waste Methods for LRW Processing and Conditioning Providing Target Indicators Associated with Reduced Specific

Volumes of Radioactive Waste], No. 9/02/133-pm of January 27, 2023.

3. Volkov A. S., Nalivaiko E. M. Obrashcheniye s radioaktivnymi otkhodami na bloke № 1 Novovoronezhskoy AES-2 proyekta AES-2006 [Radioactive waste management at the Novovoronezh NPP II-1 (NPP-2006 design)]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika — Nuclear Energy and Technology*, 2017, no. 3, pp. 183–194. DOI: 10.26583/npe.2017.3.17.

4. Avezniyazov S. R., Stakhiv M. R. Opyt raboty po obrashcheniyu s ZHRO na Kol'skoy AES [Experience of recycling the liquid radioactive waste at the Kola NPP]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 49–54.

5. Zakharova K. P., Khimchenko O. M., Sukhanov L. P. et al. Razrabotka tekhnologicheskogo rezhima tsementirovaniya solevykh kontsentratov Volgodonskoy AES. [Development of the process regime for cementing salt concentrates from the Volgodonsk

nuclear power plant]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2007, vol. 103, no. 5, pp. 884–889. DOI: 10.1007/s10512-007-0140-x.

6. Sobolev I. A., Khomchik L. M. *Obezvrezhivaniye radioaktivnykh otkhodov na tseentralizovannykh punktakh* [Radioactive Waste Treatment at Centralized Facilities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 128 p.

7. Gorbunova O. A., Kamaeva T. S. *Fizicheskiye i khimicheskiye sposoby regulirovaniya svoystv tsementnykh kompaundov s borosoderzhashchimi zhidkimi radioaktivnymi otkhodami* [Physical and Chemical Techniques of the Control of Properties of Cement Compounds with Boron-Containing Liquid Radioactive Waste]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2013, no. 1, pp. 69–76.

8. Varlakov A. P. *Nauchnoye obosnovaniye unifikirovannoy tekhnologii tsementirovaniya radioaktivnykh otkhodov* [Scientific Substantiation of a Unified Technology for Radioactive Waste Cementation]. Doctoral Dissertation in Engineering Sciences. — Moscow, GUP MosNPO Radon Publ., 2011. 325 p.

9. Remizov M. B., Melentyev A. B., Shaidullin S. M., Verbitsky K. V., Kozlov P. V., Bendasov D. I. *Razrabotka i ispytaniya evakuiruyemogo malogabaritnogo plavitelya pryamogo dzhoulevogo nagreva dizayna FGUP «PO «Mayak» dlya otverzheniya ZHRO ot pererabotki OYAT v borosilikatnoye steklo v ramkakh sozdaniya novogo kompleksa osteklovvaniya*

VAO [Evacuatable Small-Sized Direct Joule-Heated Melter Designed by PA Mayak to Immobilize LRW from SNF Reprocessing into Borosilicate Glass Developed and Tested as Part of a New HLW Vitrification Complex]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2024, no. 1 (26), pp. 35–46. DOI: 10.25283/258-9707-2024-1-35-46.

10. Marcial J. et al. Hanford low-activity waste vitrification: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, vol. 461, p. 132437. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132437.

11. Kuzin M. A. et al. *Kontseptsiya modul'nogo uzla osteklovvaniya vysokoaktivnykh otkhodov* [Concept of a modular unit for high-level waste vitrification]. Collected papers by JSC SRC RIAR, 2017, no. 1, pp. 57–62.

12. Eliseev K. V., Dmitrieva O. S., Bezdnyakova E. A. et al. *Polucheniye krupnomasshtabnogo obraztsa borosilikatnogo stekla v uzle osteklovvaniya dlya polifunktsional'nogo radiokhimicheskogo issledovatel'skogo kompleksa* [Production of a large-scale borosilicate glass sample in a vitrification unit for a multifunctional radiochemical research complex]. Collected papers by JSC SRC RIAR, 2023, no. 2, pp. 57–64.

13. Ladirat Ch. Overview on French Vitrification Processes. Joint ICTP-IAEA International School on Nuclear Waste Vitrification. 23–27 September 2019, Trieste, Italy.

Information about the authors

Sorokin Valery Trofimovich, Doctor of Technical Sciences, the Expert of the Main Technological Department on the Technological Part, JSC Atomenergoproekt (82-A, Savushkina st., St. Petersburg, 197183, Russia), e-mail: vsorokin@spbaep.ru.

Smola Evgeniy Ivanovich, Expert, JSC Atomenergoproekt (55, Savushkina st., St. Petersburg, 197183, Russia), e-mail: esmola@yandex.ru.

Skrigan Ilya Nikolaevich, PhD in Technical Sciences, Head of the Laboratory of Technology and Processes of Solidification of Radioactive Waste, JSC “V. G. Khlopin Radium Institute” (28, 2nd Murinsky ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: ilya.skrigan@khlopin.ru.

Ryabkov Dmitry Viktorovich, PhD in Technical Sciences, Deputy General Director for Science, JSC “V. G. Khlopin Radium Institute” (28, 2nd Murinsky ave., St. Petersburg, 194021, Russia), e-mail: dryabkov@khlopin.ru.

Kascheev Vladimir Alexandrovich, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Director of the Department, JSC “Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar” (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: ppp@bochvar.ru.

Suntsov Dmitry Yurievich, Head of the Department, JSC “Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar” (5a, Rogova st., Moscow, 123098, Russia), e-mail: DYSuntsov@bochvar.ru.

Bibliographic description

Sorokin V. T., Smola E. I., Skrigan I. N., Ryabkov D. V., Kashcheev V. A., Suntsov D. Yu. On the Vitrification of Still Bottoms from NPPs with WWER-1200 Reactor Units. *Radioactive Waste*, 2026, no. 1 (34), pp. 32–45. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-32-45. (In Russian).