

Переработка отработанного ядерного топлива и обращение с высокоактивными отходами



ГЛАГОЛЕНКО Юрий Васильевич,
технический директор ФГУП «ПО «Маяк»,
кандидат технических наук

РОВНЫЙ Сергей Иванович,
начальник ЦЗЛ ФГУП «ПО «Маяк»,
кандидат химических наук

МЕДВЕДЕВ Геннадий Михайлович,
начальник лаборатории ЦЗЛ ФГУП «ПО «Маяк»,
кандидат технических наук

ШЕВЦЕВ Павел Павлович,
руководитель группы ЦЗЛ ФГУП «ПО «Маяк»,
кандидат технических наук

Большинство национальных программ развитых стран предусматривает увеличение своей энергооборуженности через развитие ядерной энергетики. Сегодня в мире на различных АЭС эксплуатируются сотни реакторов, производящих электрическую энергию, доля которой в общем балансе энергии некоторых государств достигает от 30% до 75%.

Весь комплекс процессов, связанных с производством ядерного топлива и получением из него электрической энергии, составляет ядерный топливный цикл (ЯТЦ). Заключительным этапом ЯТЦ является обращение с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) после выгрузки его из реактора.

В разных странах рассматривались различные подходы к обращению с ОЯТ, включая такие крайние варианты, как прямое захоронение и регенерация в целях извлечения и последующего многократного использования урана и плутония. Последнее позволяет вовлечь в энергопроизводство весь недоиспользованный в тепловых реакторах уран и, тем самым, увеличить топливную базу ядерной энергетики во много раз. О прервенности такой стратегии заявили Россия, а также такие страны, как Франция, Англия, Япония, Китай.

В России на настоящий момент регенерацией ОЯТ занимается единственный завод, входящий в структуру ФГУП «ПО «Маяк».

Производственное объединение «Маяк» является одним из основных промышленных комплексов атомной промышленности России. Предприятие было создано в конце сороковых годов для получения оружейного плутония и переработки делящихся материалов с целью создания паритета в области ядерного оружия.

Наработка военного плутония на ПО «Маяк» была прекращена в 80-х годах прошлого века, а в связи с принятой в России концепцией замкнутого топливного цикла в ядерной энергетике на базе первого в России радиохимического завода был создан и пущен в эксплуатацию завод по регенерации облученного ядерного топлива РТ-1.

В разработке технологии участвовали специалисты ВНИИНМ им. А.А. Бочвара (В.Б. Шевченко, В.С. Шмидт, А.С. Поляков, А.М. Розен, Э.А. Ненарокомов, А.С. Соловкин и др.) и ПО «Маяк» (Б.В. Никипелов, Б.С. Захаркин, В.Д. Мельников, В.И. Основин, В.П. Уфимцев и др.), оборудование разрабатывалось и поставлялось СНИИХМ (В.Г. Шацилло, А.М. Нудель, К.А. Долгова, И.М. Балакин и др.), проектировали завод специалисты ВНИПИЭТ г. Ленинграда (В.А. Курносков, В.М. Дубровский, А.В. Серов, Э.А. Слива и др.).

В ходе проектирования была определена этапность строительства и ввода в эксплуатацию производств и мощностей завода РТ-1. Первая оче-

редь была рассчитана на переработку топлива АЭС с реакторами ВВЭР-440. В рамках первой очереди решались также вопросы регенерации ОЯТ на основе высокообогащенного урана. С вводом в эксплуатацию второй очереди мощность переработки по ТВЭЛам ВВЭР-440 возросла втрое.

В эксплуатацию были введены установки по

Благодаря многоцелевой ориентации перерабатывающего производства комплекс обладает широкими технологическими возможностями и гибкостью построения схемы регенерации топлива по сравнению с аналогичными предприятиями Великобритании и Франции.

Благодаря работе завода обеспечено эф-

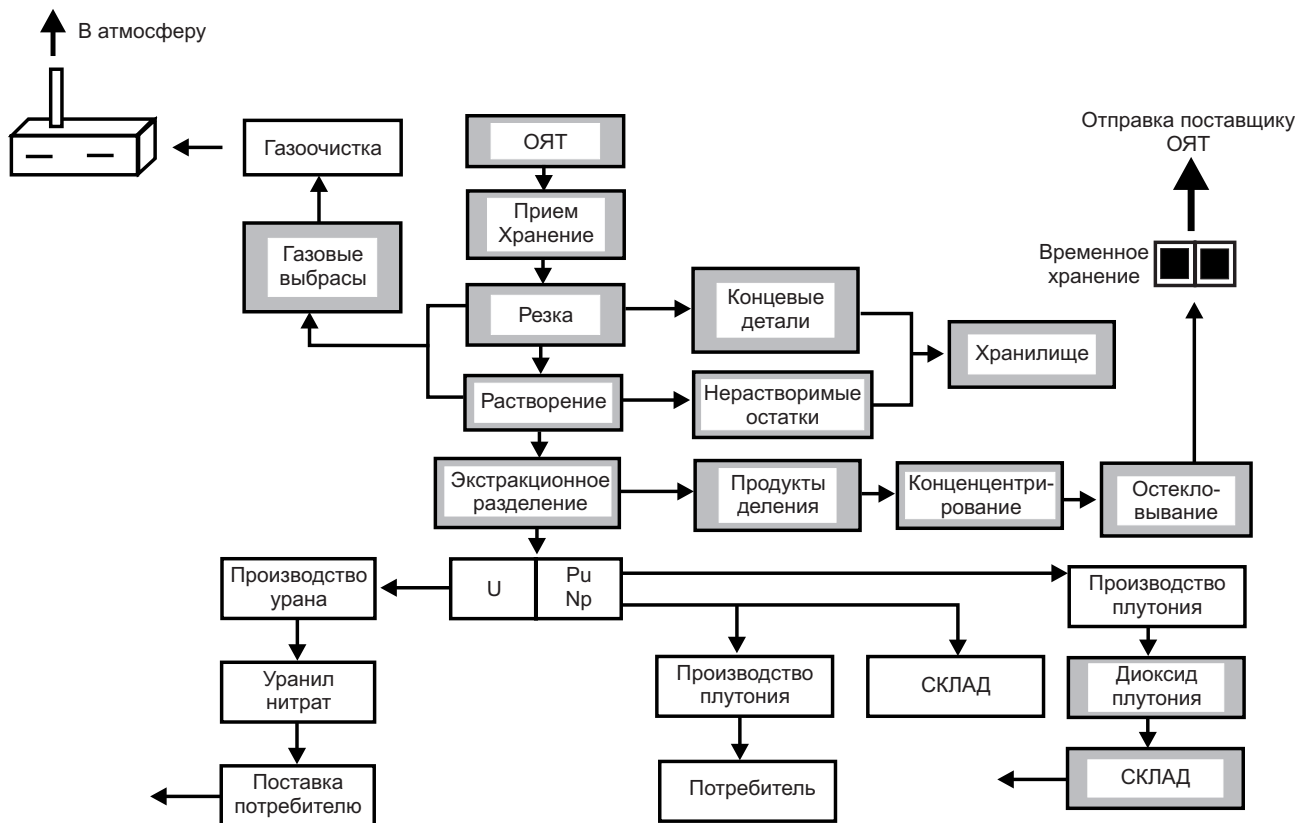


Рисунок 1. Блок-схема переработки отработанного топлива

упариванию высокоактивных отходов (ВАО) и последующему их отверждению методом остекловывания. Таким образом, главной особенностью второй очереди завода, кроме повышения производительности, стало обеспечение утилизации высокоактивных отходов и повышение безопасности производства.

В настоящее время завод РТ-1, блок-схема которого приведена на рисунке 1, является своеобразной опытно-промышленной базой отрасли по отработке и опытной проверке технологий переработки облученного топлива и радиоактивных отходов, а также промышленной переработки ОЯТ АЭС, транспортных энергетических установок, промышленных и исследовательских реакторов.

Этот комплекс занимает особое положение среди предприятий Европы, на которых производится промышленная переработка энергетического ОЯТ.

эффективное замыкание топливного цикла по «вторичному» урану – через смешивание низкообогащенного урана отработавших топливных сборок реакторов ВВЭР-440 и урана повышенной степени обогащения других облученных материалов.

В результате развития производства и вовлечения в переработку топлива исследовательских установок (более 20 типов), ОЯТ реакторов ВВЭР-440, БН-600, БН-350 возникла необходимость создания независимых технологических цепочек, чтобы регенерировать ОЯТ, близкое по составу и обогащению. Для этих целей создано три независимые технологические цепочки, на которых осуществляются однотипные операции.

Аналогичный технологический процесс реализован на заводах фирмы «Согема» (Франция) и BNFL (Великобритания).

Современное состояние и уровень развития радиохимической технологии переработки ОЯТ энергетических реакторов отражают те технологии,

которые приняты на действующих крупных радиохимических заводах: UP3 и UP2 800 (Франция), Thorp (Великобритания), сданных в эксплуатацию в 90-х годах прошлого столетия, РТ-1 в России.

Структурно каждый завод состоит из нескольких отделений:

- отделение приема и хранения ОЯТ;
- отделение подготовки ОЯТ к переработке;
- отделение резки-растворения и подготовки раствора топлива к экстракционной переработке;
- отделение экстракционной очистки урана и плутония от продуктов деления и разделения между собой (I цикл Пурекс-процесса);
- аффинажные отделения для окончательной очистки уранового и плутониевого продуктов;
- отделения концентрирования уранового и плутониевого продуктов и их оксалатного осаждения с прокаливанием;
- разнообразные установки для обработки газообразных, жидких и твердых РАО.

Несмотря на структурное сходство заводов в целом, их технологии не тождественны и различаются присущими им конкретными условиями проведения отдельных операций.

На рисунках 2 и 3 схематично показаны последовательные операции, которые проводятся с ОЯТ перед его растворением на заводе РТ-1.

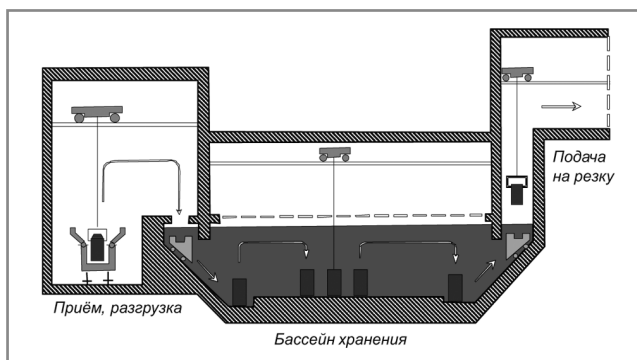


Рисунок 2. Разгрузка и хранение отработанного топлива

По окончании процесса растворения, полнота которого составляет в среднем $(99,4 \pm 0,2)\%$, проводят выдачу технологического раствора; отмытые конструкционный материал и нерастворимые остатки удаляют пневмотранспортом и направляют на захоронение. Потери урана и плутония с нерастворимыми остатками не превышают соответственно 0,01 и 0,06%. Получаемые растворы представляют собой суспензию с высокодисперсными компонентами на основе графита, кремния и других элементов, которые могут вносить существенные осложнения в последующий процесс. В этой связи

одной из ответственных стадий регенерации топлива является осветление растворов, включающее их обработку высокомолекулярными органическими флокулянтами и фильтрование на насыпных фильтрах с металлоферрическими порошками из нержавеющей стали и природными минералами.

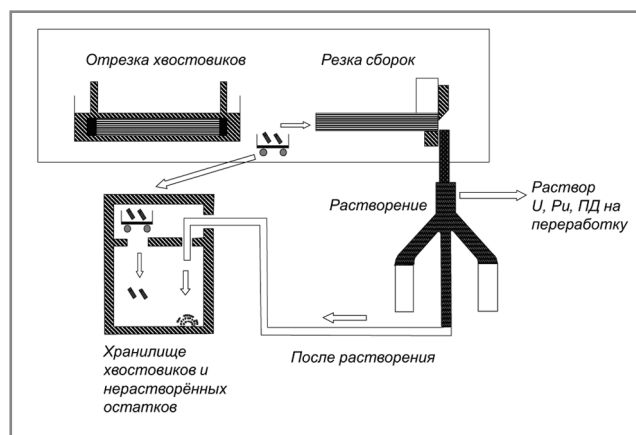


Рисунок 3. Процессы резки и растворения ОЯТ

В основе технологии переработки ОЯТ, включающей выделение из него урана, плутония, нептуния, их разделение и глубокую очистку от продуктов деления, лежит цельно-экстракционный, так называемый Пурекс-процесс, с использованием в качестве экстрагента смеси ТБФ с углеводородным разбавителем. Процесс осуществляется в многоступенчатых экстракторах типа смеситель-отстойник с механическим или пульсационным перемешиванием фаз.

Каждый из трёх (U, Pu, Np) актиноидов проходит через два цикла экстракции.

Общий коэффициент очистки от продуктов деления составляет от 10^7 до 10^9 . Фактор разделения урана и плутония – более $7 \cdot 10^5$. Потери U, Pu и Np в экстракционном процессе не превышают соответственно 0,01, 0,025 и 0,5 %.

На сегодняшний день завод РТ-1 является многофункциональным самостоятельным производством, на котором осуществляется переработка большой номенклатуры ОЯТ с высокими технико-экономическими показателями.

Выводимыми из технологического процесса завода РТ-1 продуктами являются:

- диоксид энергетического плутония с содержанием плутония-239 от 65 до 70 % масс. поступает на временное хранение на склад;
- плав гексагидрата нитрата уранила с содержанием урана-235 от 2,4 до 2,6 % масс. направляется на изготовление топлива для реакторов РБМК;
- закись-окись урана среднего и высоко-

го обогащения по урану-235 поступает на склад и частично используется для изготовления топлива для реакторов БН-600 и БН-350;

- диоксид нептуния-237 используется для реакторного получения плутония-238;

- концентраты стронция, цезия, технеция, палладия и др. (периодическая наработка для технического использования и исследовательских целей);

- фосфатное стекло с фиксированными отходами высокого уровня активности.

Важнейшим показателем технологии переработки ОЯТ является объём образующихся жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Последние по уровню радиоактивности делятся на три вида: низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО).

Анализ объёмов ЖРО, образующихся, например, в технологии регенерации ОЯТ реакторов ВВЭР, показал, что доля в них НАО составляет 95%, а САО и ВАО – соответственно 4,4 и 0,6%.

заводе РТ-1 в процессе экстракционной переработки отработанных ТВЭЛ, передаются на комплекс остекловывания, запущенный в промышленную эксплуатацию в 1987 г.

Первоначально в состав комплекса входили две электропечи типа ЭП-500 каждая производительностью 500 л/ч по перерабатываемому раствору с ресурсным сроком эксплуатации 3 года. В дальнейшем по мере выработки ресурса проектом предусматривалось строительство новых электропечей с использованием существующих систем комплекса: хранилища, транспортной схемы, газоочистного, вентиляционного и ёмкостного оборудования, систем энергообеспечения и охлаждения. Отрабатанные ресурсы электропечи консервировались по месту установки и обеспечивались необходимыми средствами мониторинга радиационной безопасности.

За прошедший период в эксплуатации находились три электропечи с проектной производительностью 500 л/ч по раствору отходов, суммарный ре-

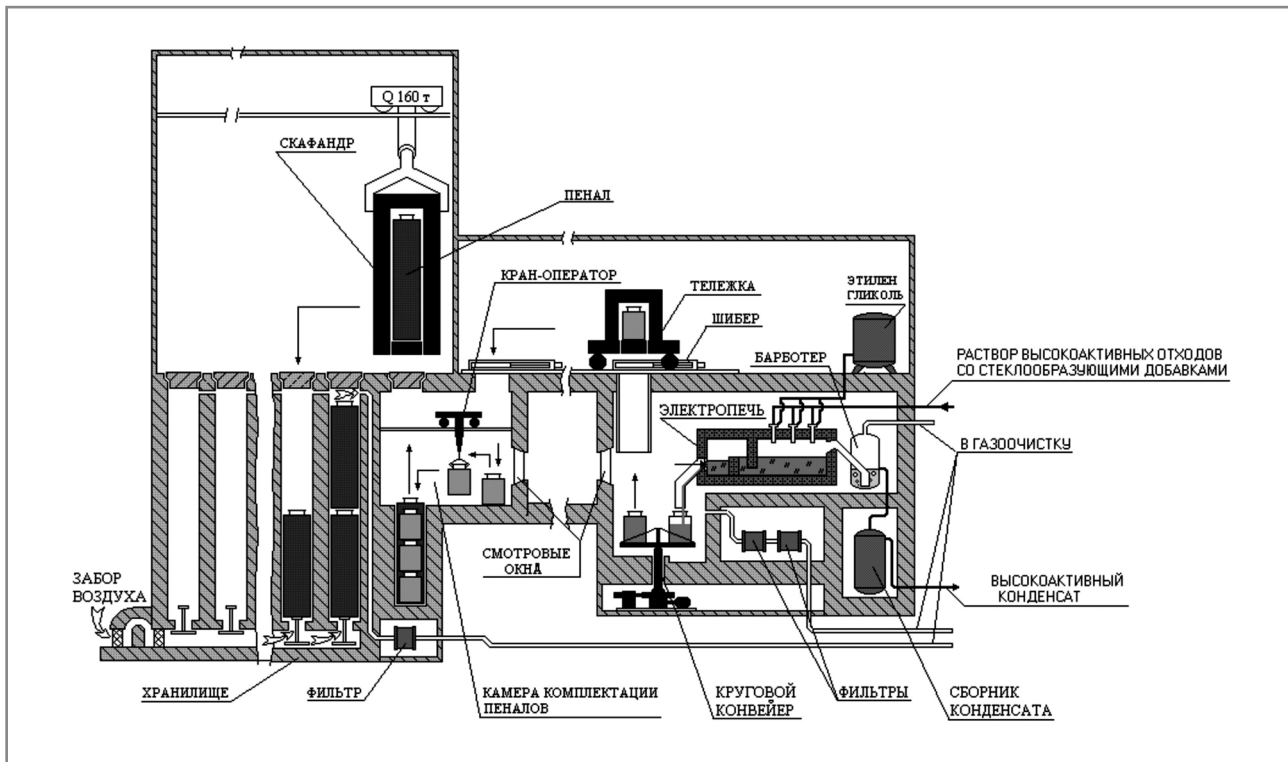


Рисунок 4. Схема остекловывания жидких высокоактивных отходов

На ПО «Маяк» принята концепция экологически безопасного обращения с отходами любого уровня активности, которая предусматривает включение радионуклидов в твёрдые инертные матрицы, пригодные для окончательного захоронения, и сброс очищенных водных растворов в окружающую среду или повторное их использование в технологическом цикле предприятия.

Высокоактивные отходы, образующиеся на

сурсный срок работы которых составил 11,8 лет. В 2006 г. в эксплуатацию введена 4-я электропечь, которая работает в настоящее время.

Технологическая схема процесса остекловывания

В основу проекта промышленного цеха остекловывания заложен процесс электроварки фосфатного стекла из растворов отходов и флю-

сующих добавок в стекловаренной электропечи прямого электрического нагрева. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема процесса остекловывания высокоактивных отходов показана на рисунке 4 и включает следующие узлы:

- систему подготовки и дозирования стеклообразующего раствора и восстановителя;
- узел остекловывания, включающий электропечь с системами розлива стекла, электропитания и охлаждения;
- систему газоочистки, состоящую из барботера, газоочистных аппаратов и фильтров;
- транспортно-технологическую цепочку, включающую транспортную тележку, круговой конвейер, камеру комплектации пеналов и защитный скафандр;
- хранилище остеклованных отходов.

Технологический процесс осуществляется следующим образом. Жидкие радиоактивные отходы из хранилища поступают в емкость для подготовки растворов к переработке, в которой смесь растворов доводится до определенного состава добавлением расчетного количества фосфорной кислоты и нитрата натрия. Подготовленный таким образом раствор поступает в электропечь непосредственно на поверхность расплавленного стекла. Одновременно с раствором отходов в электропечь дозируется раствор восстановителя (этиленгликоля) с целью создания на поверхности расплава рыхлого пенного слоя и снижения уноса радионуклидов.

При попадании раствора на поверхность расплава последовательно происходят процессы упарки раствора, сушки и денитрации солей и сплавления оксидов (образования расплава). Образующаяся при этом парогазовая смесь через газоход поступает в барботер и систему газоочистки. Конденсат, накапливаемый в барботеро-холодильнике, направляется на переработку с целью регенерации азотной кислоты.

Стекломасса из варочной зоны через переточную зону и порог перетекает в накопительную. По мере наработки стекло периодически сливается в бидоны объемом 200 литров. Подача бидонов под сливное устройство и транспорт заполненных бидонов в камеру комплектации осуществляется при помощи поворотного стола. В камере комплектации заполненные стекломассой бидоны помещаются по три штуки друг на друга в стальной пенал. Крышка пенала герметично приваривается электросваркой. Пенал с бидоном втягивается в за-

щитный скафандр и перемещается в хранилище. Хранилище представляет собой сеть бетонных колодцев (стояков). В каждый стояк помещается по два пенала, через которые прокачивается охлаждающий воздух.

Особенности конструкции и эксплуатации промышленных электропечей

Принципиальная схема основного аппарата – стекловаренной электропечи — показана на рисунке 5. Печь представляет собой бассейн прямоугольной формы, который выложен из бакоровых брусьев. Снаружи бакоровая кладка облицована шамотными блоками и шамотным кирпичом. Свод выполнен из огнеупорного бетона. Печь помещена в герметичный корпус из нержавеющей стали. Пространство между огнеупорной кладкой и корпусом электропечи засыпано кварцевым песком и шамотной крошкой. Боковые стены корпуса печи до уровня расплава и под печи снабжены трубчатыми водоохлаждаемыми холодильниками.

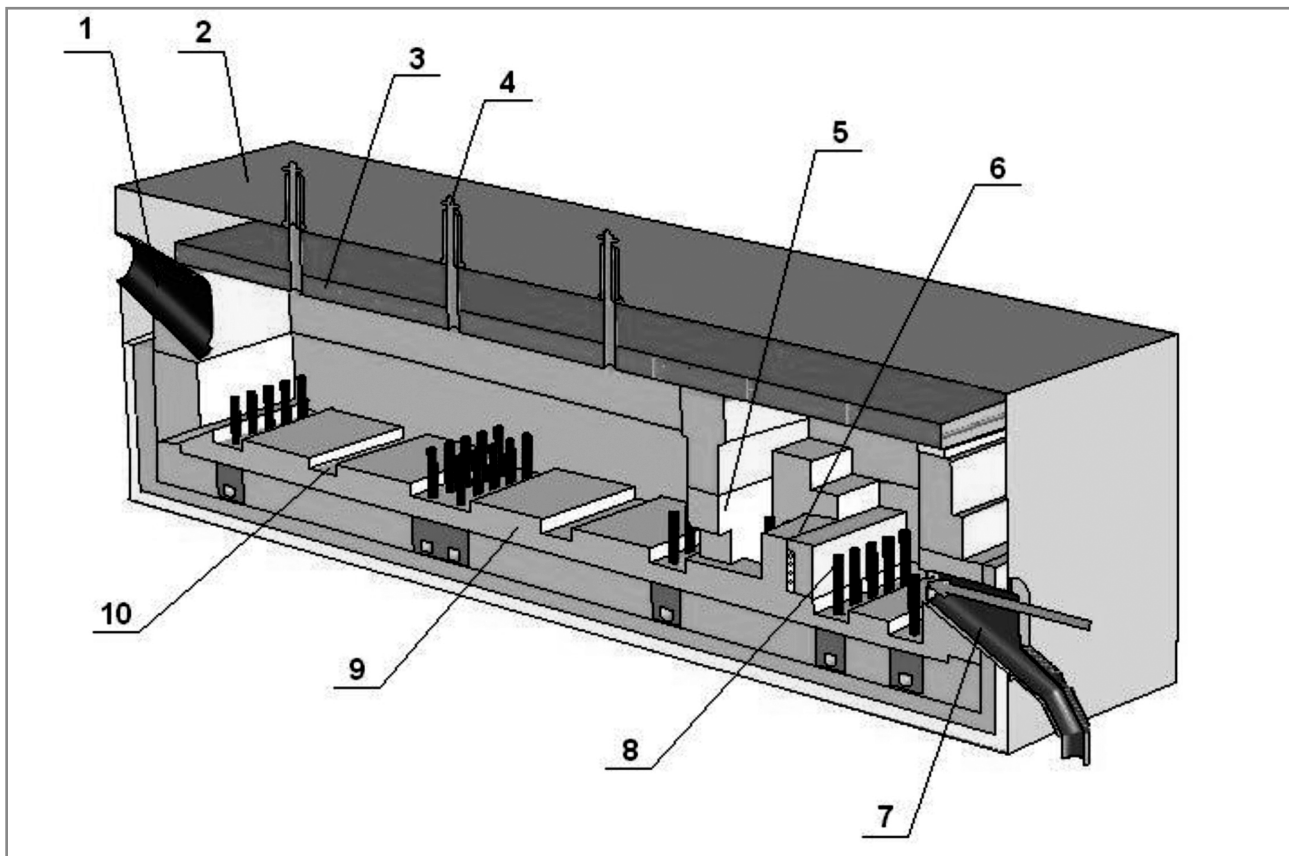
Внутри бассейн разделен на три зоны: варочную, переточную, накопительную. В нижней части перегородки имеется переточный канал, через который проваренное стекло из варочной зоны поступает в переточную и далее в накопительную. Переточная зона отделена от накопительной порогом, который служит для поддержания постоянного уровня стекла в варочной зоне. В торцевой части накопительной зоны установлены 2 сливных устройства: рабочее и резервное. В торцевой части варочной зоны расположен водоохлаждаемый газоход, соединяющий печь с барботеро-холодильником. Дозировка исходного раствора в электропечь ведется через три водоохлаждаемых питателя, установленных в своде электропечи.

Для подвода электроэнергии в поде электропечи размещены водоохлаждаемые трубчатые токоподводы из нержавеющей стали, на которых установлены молибденовые электроды, выполненные в форме цилиндрических стержней.

Технические характеристики электропечи и основные параметры технологического процесса представлены в таблице (Таблица 1).

Результаты эксплуатации цеха остекловывания

В настоящее время завершена эксплуатация трех электропечей и проводится остекловывание растворов в четвертой электропечи. Сроки работы электропечей представлены в таблице 2.



1 – газоход, 2 – корпус печи, 3 – свод, 4 – питатели, 5 – перегородка, 6 – порог, 7 – сливное устройство, 8 – молибденовые электроды, 9 – баковая кладка, 10 – приямок

Рисунок 5. Электрическая печь ЭП-500

Таблица 1. Характеристика процесса остекловывания ВАО в плавителе ЭП-500

Параметр	Характеристика
Плавитель	трехзонный, с молибденовыми электродами, периодическим сливом стекла
Габариты плавителя	длина – 9,5 м, ширина – 4,2 м, высота – 3,2 м
Консистенция раствора	солеосодержание: 350 – 370 г/л; сумма по оксидам: 200 – 250 г/л; вода: до 70 %
Производительность	по раствору: 450 – 500 л/ч, по стеклу: 1,8 – 2,0 т/сут
Электрическая мощность	варочной зоны – 600 кВт, накопительной зоны – 160 кВт
Электроды	молибденовые, диаметром – 80 мм, в варочной зоне – 2 пары по 10 штук, в накопительной зоне – 1 пара по 10 штук
Удельная плотность тока на электродах	0,3 А/м ² (проектом допускается до 1 А/м ²)
Токоподводы	водоохлаждаемые трубы из нержавеющей стали диаметром 114 x 9 мм
Рабочая температура	900 – 1100 °С
Объем ванны	в варочной зоне – 4,2 м ³ , в накопительной зоне – 0,8 м ³
Площадь поверхности расплава	в варочной зоне – 10,5 м ² , в накопительной зоне – 2,0 м ²
Стекло	фосфатное
Слив	боковой, водоохлаждаемый с подвижным запорным устройством
Хранение блоков высокоактивного стекла	пенал из 3 бидонов
Масса стекла в бидоне	450 – 480 кг
Масса стекла в пенале	1350 – 1440 кг
Удельная активность стекла	300 – 350 Ки/л (по проекту – до 1500 Ки/л)
Удельный расход электроэнергии	0,7 – 1,5 кВт·ч/л
Срок службы	проектный – 3 г., фактический – 6 лет

ОХРАНА ПРИРОДЫ ЮЖНОГО УРАЛА '08

В течение всего срока эксплуатации цеха остекловывания было переработано 24570 м³ жидких высокоактивных отходов с бета-активностью 520 млн Ки и получено 4986 тонн фосфатного стекла.

Таблица 2. Сроки эксплуатации электропечей остекловывания жидких высокоактивных отходов

Электропечь	Сроки эксплуатации, гг.
ЭП-500/2	1987 – 1988
ЭП-500/1-р	1991 – 1997
ЭП-500/3	2001 – 2006
ЭП-500/4	2007 – 2012 (по плану)

Таким образом, на ПО «Маяк» в промышленном масштабе реализована технология остекловывания жидких высокоактивных отходов. Показана высокая эффективность основных технических решений, заложенных в аппаратурно-технологическую схему и оборудование, обусловивших многолетнюю эксплуатацию комплекса остекловывания. В ходе эксплуатации отработан оптимальный технологический режим процесса остекловывания высокоактивных отходов, обеспечивающий минимальный износ оборудования и продление срока экс-

плуатации электропечей сверх проектного – более трех лет.

При создании комплекса остекловывания над разработкой, освоением оборудования и технологии работал большой коллектив учёных, инженеров различных специальностей ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, ОАО СНИИХМ, ВНИИПИ-ЭТ, труд которых получил высокую оценку правительства России. Указом Президента от 10 июня 1997 г. за разработку и реализацию технологии и оборудования остекловывания жидких отходов высокого уровня радиоактивности удостоены звания лауреатов Государственной премии Российской Федерации восемь человек, в том числе от ФГУП «ПО «Маяк» лауреатами стали А.А. Константинович, В.А. Бельтюков, С.Е. Степанов.

В настоящее время с учётом накопленного опыта эксплуатации активно ведутся предпроектные исследования по строительству третьей очереди цеха остекловывания, предусматривающие расширение хранилища и создание печного отделения, для которого разрабатываются печи нового поколения повышенной надёжности, отвечающие требованиям экологической безопасности и обеспечивающие ресурсный срок эксплуатации до 10 лет.