



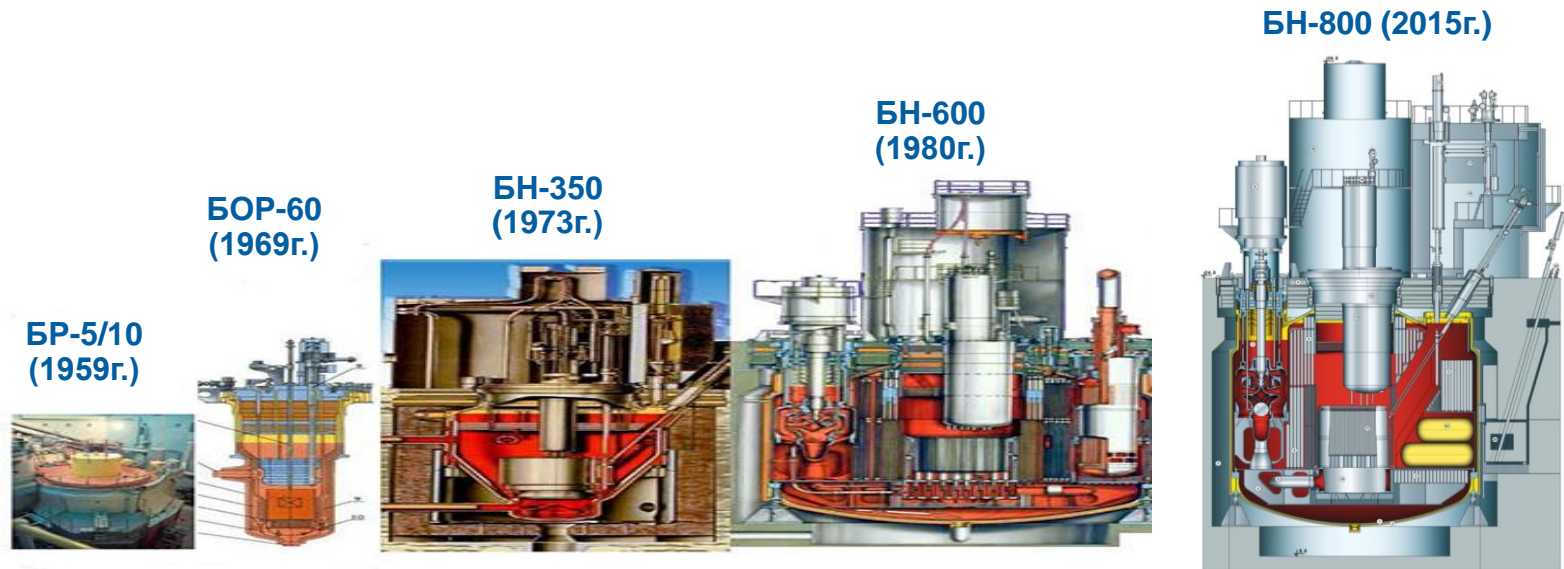
ФЭИ
РОСАТОМ

ПЕРЕРАБОТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ 1-го и 2-го КОНТУРОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-350

Смыков В.Б. (к.т.н.), Журин А.В., Легких К.Г., Алексеев В.В. (д.т.н.), Жданов В.П.

Введение

Госкорпорация «Росатом» – мировой лидер в области реакторов на быстрых нейтронах



В Госкорпорации «Росатом» **накоплен 60-летний опыт и компетенции**, необходимые для **сопровождения реакторов на быстрых нейтронах** на протяжении всего жизненного цикла.

Исторические сведения реактора БН-350

- БН-350 - первый в мире опытно-промышленный реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.
- Проектная тепловая мощность составляет 1000 МВт.
- Физический пуск осуществлен 29.11.1972 г.
- Энергетический пуск осуществлен 16.07.1973 г.
- Решение о выводе из эксплуатации принято Постановлением Правительства РК №456 от 22.04.1999г.



Вклад АО «НИКИМТ-Атомстрой» в создание БН-350



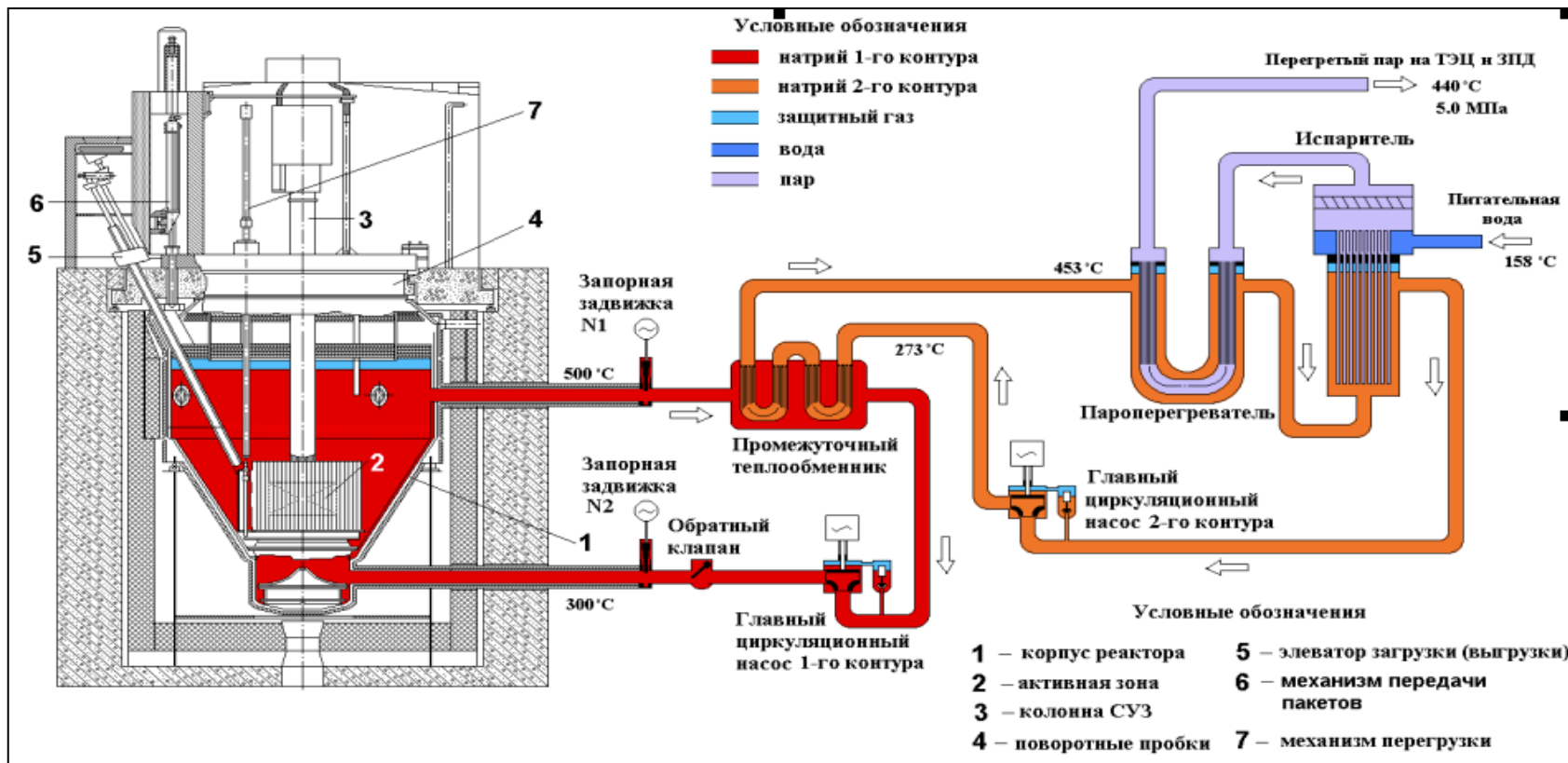
- Предприятием п/я Р-6476, преемником которого в настоящее время является АО «НИКИМТ-Атомстрой», в период **с 1964 по 1973** годы были разработаны технологические процессы (ТП) и проекты производства работ (ППР) на проведение работ связанных с монтажом и ремонтом реактора БН-350 (изделие ОК-500), а также разработана необходимая оснастка для выполнения данных работ.
- Впервые при создании реактора БН-350 часть **ремонтного оборудования была разработана универсальным** для монтажа и для замены в процессе эксплуатации. Такой подход не только сократил общие затраты, но и позволил в «чистых» условиях монтажа его отладить, настроить и гарантировать дальнейшую работоспособность при ремонте в процессе эксплуатации.
- Всего предприятием п/я Р-6476 было разработано и выпущено 7 технологических схем, 6 стендов, 8 установок, произведен монтаж и наладка оборудования 1 и 2 – контура РУ и вспомогательного оборудования.

Принципиальная технологическая схема РУ БН-350

Реактор БН-350 петлевого типа с трехконтурной схемой теплоотвода (натрий-натрий-вода)



ФЭИ
РОСАТОМ



Мероприятия по обращению

с жидкометаллическим теплоносителем РУ БН-350



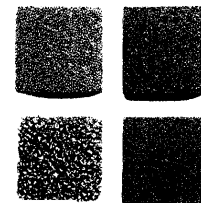
- Проведена очистка теплоносителя первого контура от радионуклидов цезия. Удельная активность натрия 1 контура после завершения процесса очистки – $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (370 Бк/г);
- Изготовлено и смонтировано оборудование для сверления напорного коллектора реактора и выполнено уникальное сверление на глубине более 13,4 м в натриевой среде с температурой 280...300°C для выполнения проекта по дренированию теплоносителя;
- 30.11.2004 - осуществлено дренирование теплоносителя из корпуса реактора БН-350. С учетом 100 м³ натрия, имевшегося в баках до начала дренирования, количество натрия в баках системы хранения после дренирования составляет 600...610 м³;
- Выполнены мероприятия по безопасному хранению натрия до его переработки;
- Поэтапно дренирован натрий из петель и ПТО второго контура;
- Реализован проект по розливу натрия второго контура в 100 литровые барабаны и отправка его на АО «УМЗ» для использования в танталовом производстве и утилизации;

Очистка теплоносителя 1-го контура от Cs-137

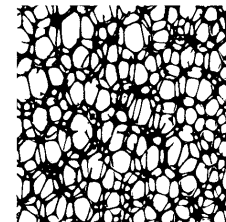


Цель проекта: снижение количества радиоактивного цезия в первом контуре реакторной установки БН-350.

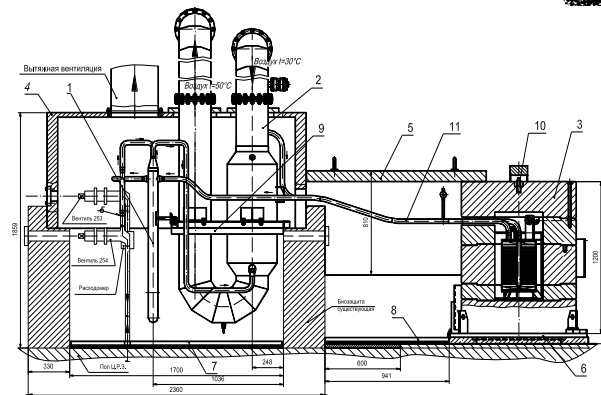
- Начальная активность цезия в 1 контуре:
 $3,7 \cdot 10^{14}$ Бк (10000 Ки), удельная активность – $7,25 \cdot 10^8$ Бк/кг натрия или (19 мКи/кг)
- Удельная активность натрия 1 контура после завершения процесса очистки снижена в 2000 раз:
 $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10 мКи/кг)



Исходный материал RVC
с закрытой пористостью



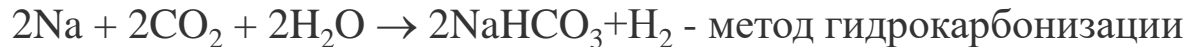
Увеличенный снимок материала RVC,
демонстрирующий структуру с открытыми порами



Удаление остатков натрия из оборудования и трубопроводов (СУОН)

➤ Назначение СУОН – удаление натрия, оставшегося после дренирования натриевого теплоносителя из корпуса реактора, оборудования и трубопроводов 1-го и 2-го контуров РУ БН-350

➤ Физико-химическая основа методов удаления остатков натрия – взаимодействие натрия с водой или увлажненным углекислым газом с образованием гидроксида натрия NaOH или бикарбоната натрия NaHCO₃ и водорода :



Установка по переработке натрия УПН



Завершен монтаж вспомогательных систем, основного технологического оборудования и оборудования АСУ и КТП. С 26.09.08 г. по 01.12.08 г. проведены системные и комплексные пусконаладочных работы УПН с натрием второго контура. В рамках реализации проекта планировалась переработка 610 м^3 натрия 1-го контура и 20 м^3 сплава натрий-калий в 35 % щелочь (объемом $\approx 2200 \text{ м}^3$), для последующего перевода в геоцементный камень на УПН ГЦК. Реализация проекта УПН позволила бы обеспечить:

- Безопасность при выводе РУ БН-350 из эксплуатации;
 - Снижение эксплуатационных расходов;
 - Решение проблемы обращения с большими объемами химически активных щелочных металлов;
 - Получение свободных объёмов для удаления остатков натрия.
- **Но проект реализован не был «по различным причинам».**

Удаление остатков натрия из оборудования и трубопроводов

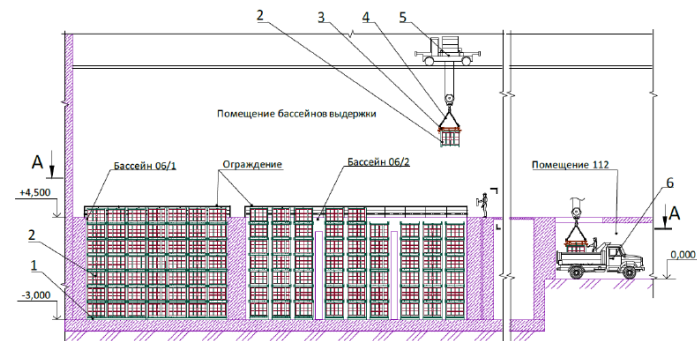


После дренирования основной массы реакторного натрия в трубопроводах и оборудовании все равно остается его заметное количество в виде недренируемых остатков. Неизбежно потребуются их химическая нейтрализация, удаление продуктов нейтрализации и последующая дезактивация внутренних стальных поверхностей.

Вид внутренней металлической поверхности бассейна выдержки после восстановления герметичности БВ-06/3, 07/1, 07/2 нанесением эпоксидного покрытия



Осушенные бассейны выдержки можно использовать для временного хранения РЕ с продуктом ТФО натрия 1-го контура перед окончательным захоронением.



Холодная фильтр – ловушка окислов натрия (ХФЛО)

Назначение ХФЛО

ХФЛО входит в систему очистки натрия от окислов, гидратов, карбонатов и других примесей:

- при разогреве и заполнении натриевых контуров на системе приготовления теплоносителя (сб. 150 - 2 шт.)
- для очистки натрия первого контура (сб. 50 - 5 шт.)
- для очистки натрия второго контура (сб. 150 - 6 шт.)
- на системе охлаждения отработавших пакетов (сб. 50 - 1 шт.).

Конструкция и параметры ХФЛО сб. 50 и сб. 150 идентичны, на ХФЛО (сб. 150) второго контура и системы приготовления теплоносителя отсутствует биологическая защита.

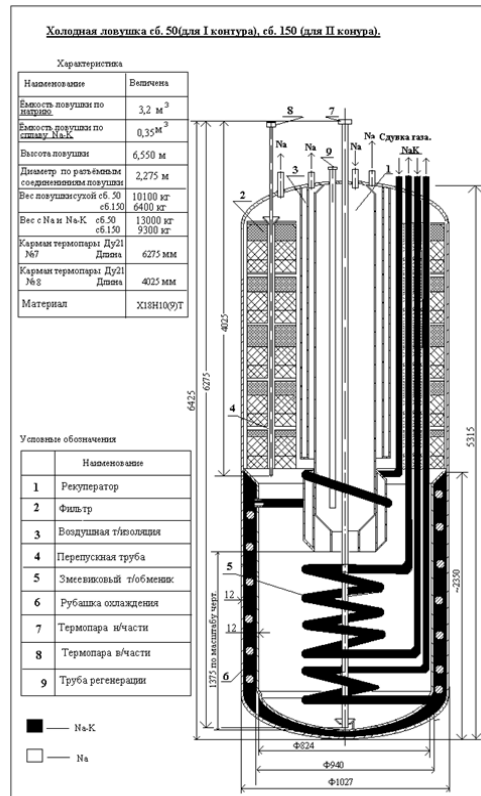
Все ХФЛО находились в эксплуатации на РУ БН-350 с 1972 года.

Замечаний по их работе не было.

ХФЛО представляет собой герметичный сосуд вертикальный, высотой 5135 мм и диаметром 1050 мм, изготовленный из нержавеющей стали.

Нижняя половина ловушки имеет наружную рубашку охлаждения, верхнее и нижнее днища ловушки эллиптической формы. К верхнему днищу ловушки крепится рекуператор – двойной цилиндр. Пространство (цилиндрическое) между стенками ловушки и рекуператора заполнено блоками со стружкой из нержавеющей стали. Ниже рекуператора установлен змеевик охлаждения.

Все ХФЛО заполнены натрием, объём одной ловушки 3,2 м³. Технологии дренирования натрия и обезвреживания от остатков натрия отсутствуют.



Состояние вывода из эксплуатации ИР БР-10

В ГНЦ РФ-ФЗИ на ИР БР-10 осуществлена разработка и применение новых безопасных технологий переработки РАО отработавших щелочных жидкометаллических теплоносителей (Na, NaK, NaKHg):

- твердофазное окисление (ТФО) сдренированного щелочного теплоносителя;
- Усовершенствованная технология твердофазного окисления (ТФО) сдренированного щелочного теплоносителя с примесью ртути;
- газофазная нейтрализация (ГФН) недренируемых остатков щелочного теплоносителя.

Создано и пущено в эксплуатацию новое оборудование для их практической реализации.

Безопасность технологий и оборудования обеспечивается практическим **отсутствием выделения водорода** при переработке РАО щелочных металлов.



Переработка натрия 1-го и 2-го контура технологией ТФО



Переработан в твёрдый шлакоподобный компаунд:

- На 2-го контура из 2-х сливных баков 1 и 2 петли и из 2-х ХЛО 2-го контура,
- На 1-го контура из сливного бака 1-го контура,
- На 1-го контура из 13 ХЛО 1-го контура.

Реакционные ёмкости с переработанными РАО Na

Применение технологии ТФО для переработки натрия 1-го контура РУ БН-350

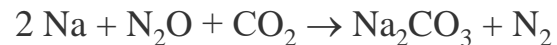
1. Для переработки Na 1-го контура РУ БН-350, предварительно очищенного от изотопа Cs-137 (коэффициент очистки достигал 2000), сделана оценка уровня удельной радиоактивности продукта его переработки технологией ТФО (шлакоподобный компаунд). Показано, что, исходя из удельной радиоактивности Na $3 \cdot 10^5$ Бк Cs-137/кг **после очистки, продукт ТФО будет иметь удельную радиоактивность в 5,3 раза ниже** и будет уже относиться к низкоактивным РАО (удельная радиоактивность ниже 10^5 Бк/кг).

2. Данное обстоятельство позволяет использовать для длительного хранения или захоронения более ёмкий металлический защитный контейнер **КМЗ-М-АТ-2, в котором можно расположить уже 5 РЕ** с продуктом переработки натрия (вместо 4 РЕ в НЗК-150-1,5П). Кроме того, увеличение высоты внутреннего объёма КМЗ на 200 мм (до 1109 мм) позволяет повысить высоту РЕ до 1100 мм и увеличить разовую загрузку в неё щелочного металла до 150 литров.

3. В варианте временного хранения отработанных РЕ с продуктом ТФО натрия 1-го контура в сухих (освобождённых от ОЯТ) бассейнах выдержки (БВ), для переработки накопленных 680 м^3 радиоактивного натрия потребуется 4533 штук РЕ, при квадратной укладке которых в БВ необходим объём около 2000 м^3 . Таким образом, имеющихся **объёмов БВ 06/1 и БВ 06/2 с избытком хватает для размещения всего объёма переработанного натрия** 1-го контура и натрия, слитого из отработанных ХФЛО, технологией ТФО и отпадает необходимость строительства дополнительного хранилища отверждённых РАО на площадке РУ БН-350.

Газо-фазная нейтрализация остатков натрия в ХЛО

Экспериментальная проверка показала, что процесс газо-фазной нейтрализации остатков натрия с примесями в ХЛО проходит с образованием **безопасного карбоната натрия** и выделением газообразного **азота**:



К настоящему времени обезврежены **2 ХЛО 2-го контура** и **13 ХЛО 1-го контура**.

На технологию газофазной нейтрализации получен патент РФ на изобретение № 2794139 «Способ перевода оборудования с недренлируемыми остатками щелочного металла во взрывопожаробезопасное состояние и устройство его осуществления» (приоритет от 29.12.2021 года, патентообладатель – АО «ГНЦ РФ-ФЗИ имени А.И. Лейпунского»).

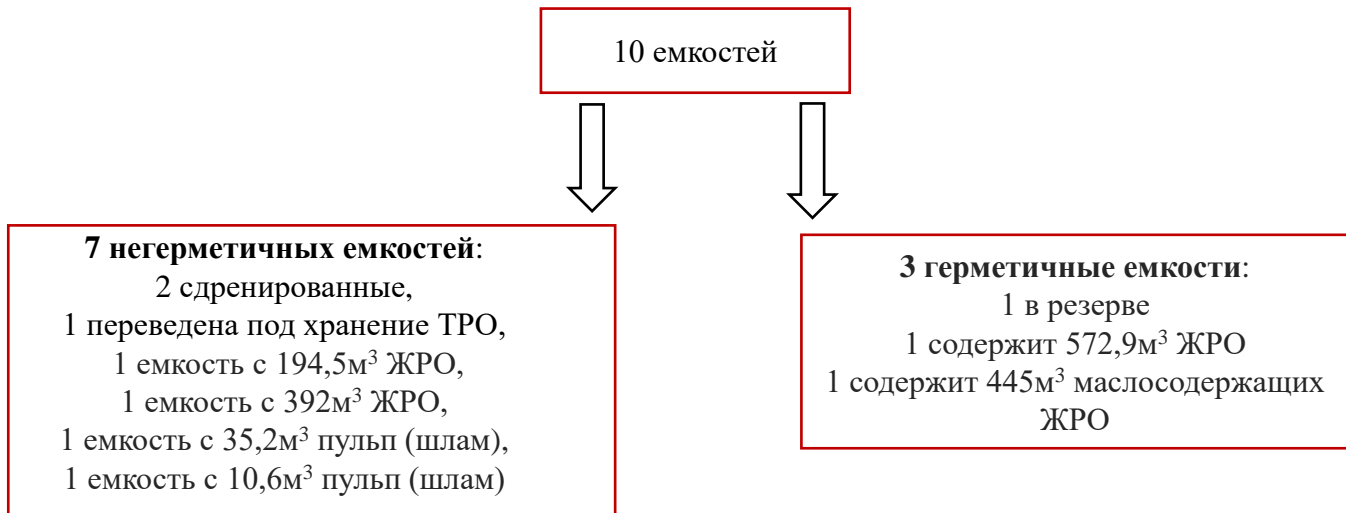


Модуль ЛУИЗА-РАО для нейтрализации недренлируемых остатков Na в баках, петлях, ХЛО

Объемы ЖРО, накопленные в емкостях-хранилищах БН-350

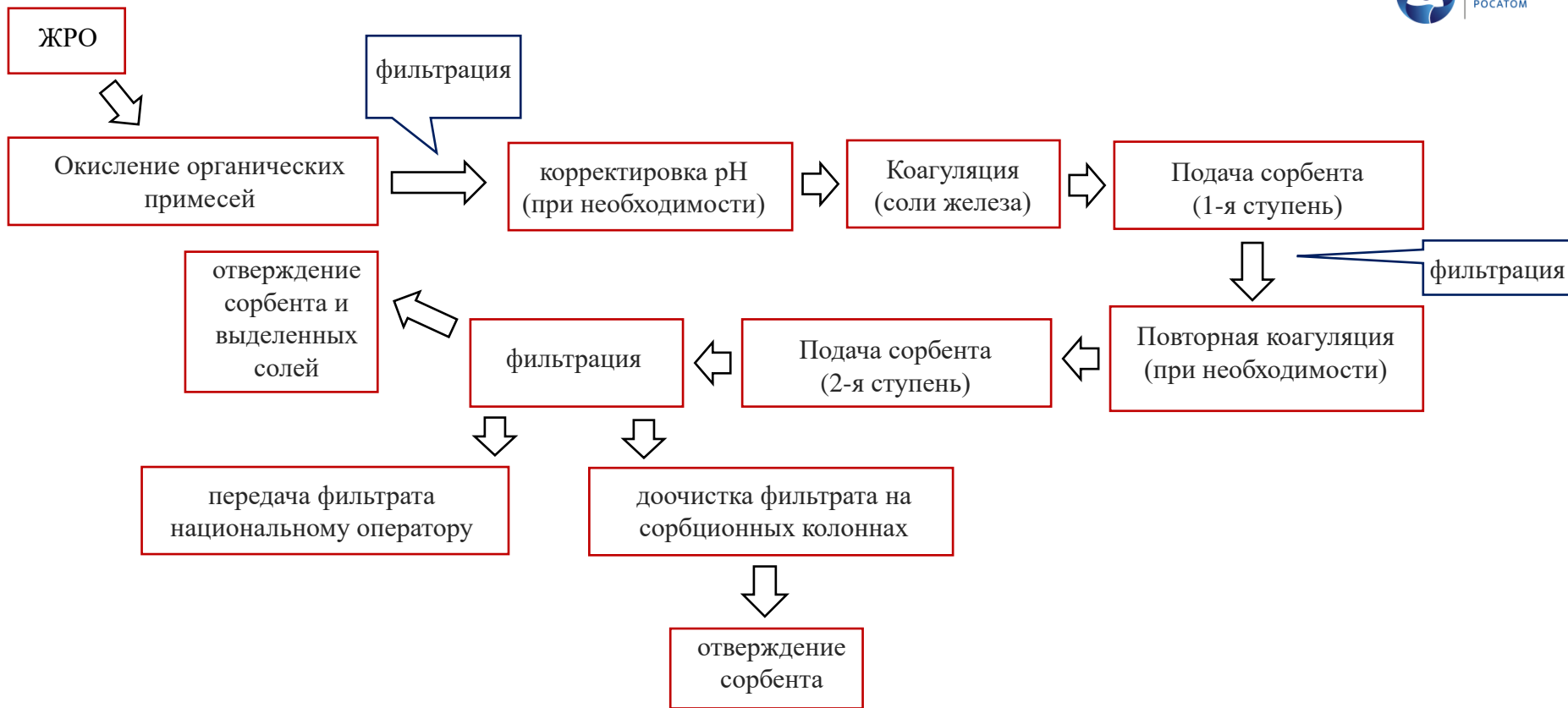


В настоящее время накоплено **1650,2 м³** высокосолевых ЖРО
солесодержание ~ **400 г/л**;
средняя активность ~ **108 Бк/л**
основные радионуклиды: **цезий-137, стронций-90**



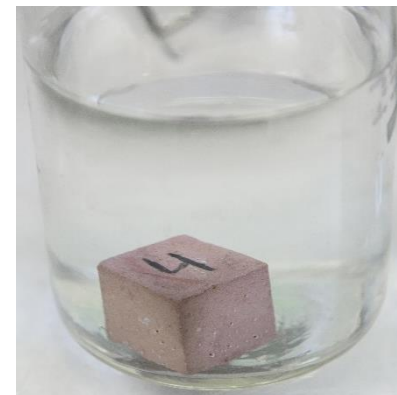
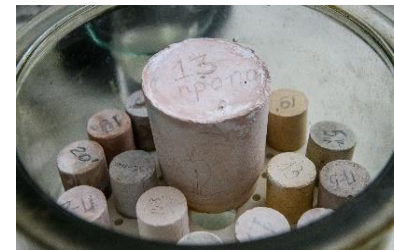
Была предпринята попытка **прямой сорбционной очистки** ЖРО. Из-за высокого солесодержания и значительной концентрации органических примесей удалось очистить порядка 100 л ЖРО. **Технология была признана неэффективной.** Других попыток переработать ЖРО не предпринималось.

Предлагаемая схема переработка жидких радиоактивных отходов



По результатам многолетних исследований наилучший показатель эффективности сорбции был достигнут клиноптилолитом

радионуклид	Исходная активность, Бк/л	Степень сорбции для модификаций, %		
		КЛН	КЛН-MnO ₂	КЛН-Fe(OH) ₃
Cs ¹³⁷	1,67·10 ⁵	98,6	98,9	98,4
Cs ¹³⁴	2,37·10 ³	96,8	98,4	99,8
Sr ⁹⁰	9,00·10 ⁴	99,8	95,1	99,8
Co ⁶⁰	6,80·10 ³	67,3	92,9	97,8



Степень сорбции широко используемого **термоксида -35** по отношению к Cs¹³⁷ при исходной активности 6,7·10⁷ Бк/л составляет **98,67%**, степень сорбции **клиноптилолита** по отношению к Cs¹³⁷ при той же активности радионуклида составляет **99,07%**.

Патент РФ 2 154 317 Способ переработки жидких радиоактивных отходов

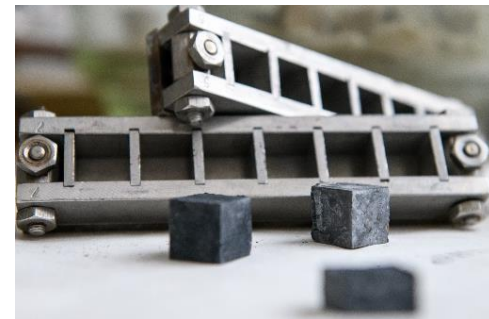
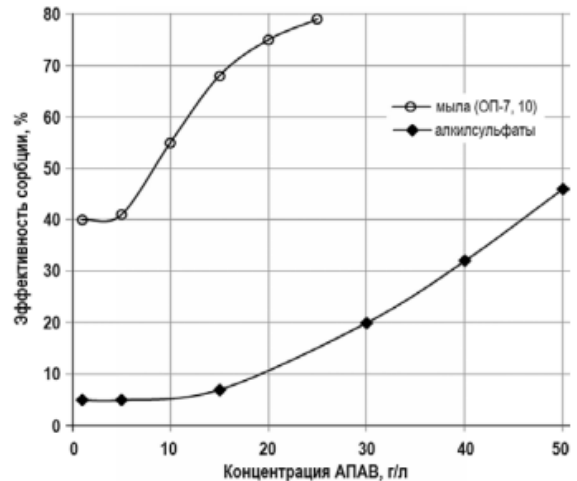
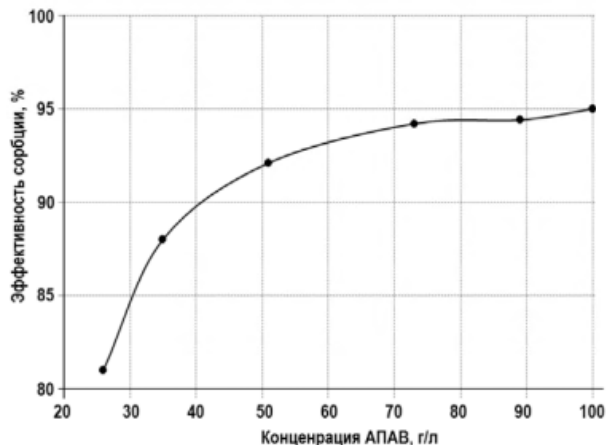
Патент РФ 2 225 049 Способ кондиционирования жидких радиоактивных отходов с высоким солесодержанием

Патент РФ 2 271 586 Способ иммобилизации концентрированных жидких радиоактивных отходов (варианты)

Патент РФ 2 473 145 Способ переработки жидких радиоактивных отходов от применения дезактивирующих растворов

Эффективность сорбционной очистки серии модельных растворов ЖРК активированным пиролюзитом

Концентрация ОП-7,10 в исходном растворе, г/л	Эффективность сорбции ($a_{эф}$), %
26	81,0
35	88,0
51	94,1
73	93,2
89	94,4
100	95



Заключение

1. В ГНЦ РФ-ФЗИ на ИР БР-10 осуществлена разработка и **применение новых безопасных технологий переработки** РАО отработанных щелочных жидкометаллических теплоносителей (Na, NaK):

- твёрдофазное окисление (ТФО) для сдренированных щелочных металлов,
- технология газофазной нейтрализации (ГФН) недренируемых остатков щелочных металлов.

2. Создано и пущено в эксплуатацию **новое оборудование для их практической реализации**. Безопасность технологий и оборудования обеспечивается практическим отсутствием выделения водорода при переработке РАО щелочных металлов.

3. К концу 2023 года предлагается создать и **вести в эксплуатацию** на ИР БР-10 более производительную установку разовой **производительностью 100-150** литров натрия для вывода из эксплуатации БОР-60 (НИИАР) и БН-350. В целях экономии упаковочных материалов возможно **временное хранение РЕ с продуктом ТФО в пустых бассейнах выдержки ОЯТ** РУ БН-350.

4. Предложен способ переработки **высокосолевых ЖРО и ЖРК**.

Спасибо за внимание

Докладчик - Смыков Владимир Борисович, к.т.н.
Заместитель начальника отдела 77 (ОВЭ)

Тел.: +7 (484) 399 8725

Моб. тел.: +7 (910) 608 13 02

E-mail: smykov@ippe.ru

www.rosatom.ru

14.07.2023 г.

