

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского

ОБ-0312

В. Б. Смыков, Р. М. Щепелев, И. Л. Шкарупа

**Краткий анализ проблемы обезвреживания отработанных
щелочных ЖМТ при реализации программ вывода
из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах»**

Аналитический обзор

Обнинск – 2025

Смыков В. Б., Щепелев Р. М., Шкарупа И. Л.

Краткий анализ проблемы обезвреживания отработанных щелочных ЖМТ при реализации программ вывода из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах : Обзор ОБ-0312. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 54 с.

В данном обзоре проведён краткий анализ проблемы обезвреживания отработанных щелочных ЖМТ при реализации программ вывода из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах. Описаны особенности различных подходов к работам по выводу из эксплуатации зарубежных и российских быстрых реакторов, таких как EBR-II, FFTF, Phenix, Superphenix, Dounreay, БР-10.

Ключевые слова: быстрый натриевый ядерный реактор, радиоактивные отходы, обезвреживание отработанных жидкометаллических теплоносителей.

This review provides a brief analysis of the problem of decontamination of spent alkaline fuel and lubricants during the implementation of decommissioning programs for fast neutron reactors. The features of various approaches to decommissioning of foreign and Russian fast reactors such as EBR-II, FFTF, Phenix, Superphenix, Dounreay, BR-10 are described.

Keywords: fast sodium nuclear reactor, radioactive waste, neutralization of spent liquid metal coolants.

Содержание

Список принятых сокращений	4
Введение.....	5
1 Область применения.....	5
2 Категории натрий-загрязненных отходов	7
3 Экспериментальный реактор-размножитель EBR-II, США.....	9
4 Высокопоточный опытный быстрый реактор FFTF, США.....	13
5 Реактор Phenix, Франция	15
6 Реактор Superphenix, Франция.....	20
7 Быстрые реакторы в Dounreay, Шотландия.....	25
8 Исследовательский Быстрый реактор БР-10.....	37
9 Применение инфракрасных технологий	48
Заключение	51
Список литературы	52

Список принятых сокращений

ANDRA	Agence Nationale pour la Gestion Des Déchets Radioactifs (Национальное Агентство по управлению радиоактивными отходами)
ASWS	система обработки водяным туманом
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique (Комиссариат по атомной энергии)
CIRES	Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (Промышленный центр хранения радиоактивных отходов)
CRCTA	Composite Reactor Components Test Activity (контур испытаний композитных реакторных материалов)
DFR	Dounreay Fast Reactor (быстрый реактор Dounreay)
DOTE	модель промежуточного теплообменника
DSRL	Dounreay Site Restoration Limited (Центр восстановления в Dounreay)
EBR-II	Experimental Breeder Reactor II (экспериментальный реактор-размножитель)
FFTF	Fast Flux Test Facility (высокопоточный опытный быстрый реактор)
IAEA	МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии)
INL	Idaho National Laboratory (Национальная лаборатория Айдахо)
LIOSO	области соединений насосов и трубопроводов (Superphenix)
NaK	сплав натрия – калий
PFR	Prototype Fast Reactor (быстрый реактор-прототип)
SFEN	French Nuclear Energy Society (Французское общество по ядерной энергии)
ГНЦ РФ – ФЭИ	Государственный научный центр Российской Федерации «Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»
ИР БР-10	исследовательский быстрый реактор БР-10

Введение

При выводе из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах одной из самых сложных проблем является кондиционирование радиоактивных отходов использовавшегося щелочного жидкометаллического теплоносителя. Вывод из эксплуатации реакторов типа БН является лишь одним из многих сложных текущих проектов во всем мире в области атомной энергетики. Исследователи, сталкивающиеся с этой общей проблемой, встретились во Французском обществе по ядерной энергии (SFEN) на пятой международной конференции «Проблемы вывода из эксплуатации», которая была проведена в Авиньоне, Франция, с 7 по 11 апреля 2013 года. Данная проблематика обсуждалась на сессии № 8 конференции, прошедшей под эгидой МАГАТЭ. Участники конференции успели поделиться новыми идеями, исследованиями существующих проблем и полученным опытом в отношении обращения с натрием и сплавом NaK в качестве смешанных радиоактивных отходов.

Целью данного обзора является описание различных технологий обращения с натриевыми и натрий-калиевыми отходами, которые были представлены на сессии Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) конференции SFEN. Некоторые методы являются более эффективными для переработки общей массы натрий-загрязненных отходов, в то время как другие методы являются более эффективными для удаления остатков натрия из сложного оборудования. Данная работа описывает различные методы, которые должны учитываться при выборе технологии обращения с натрий-загрязненными отходами. Сделанный на конференции доклад России по опыту обращения с отработанными щелочными теплоносителями на ИР БР-10 дополнен в настоящем обзоре последними результатами.

1 Область применения

В настоящем обзоре представлены категории натрий-загрязненных отходов и существующие задачи вывода из эксплуатации семи различных быстрых реакторов, находящихся в четырех разных странах (США, Франция, Шотландия, Россия). Также изучаются современные технологии обращения с натрием, достижения и опыт, которые представляют ценность в области проектов вывода из эксплуатации реакторов. На рис. 1 представлено отношение категорий натриевых отходов к докладам сессии МАГАТЭ, которые описывают соответствующие технологии обращения с натрий-загрязненными отходами.

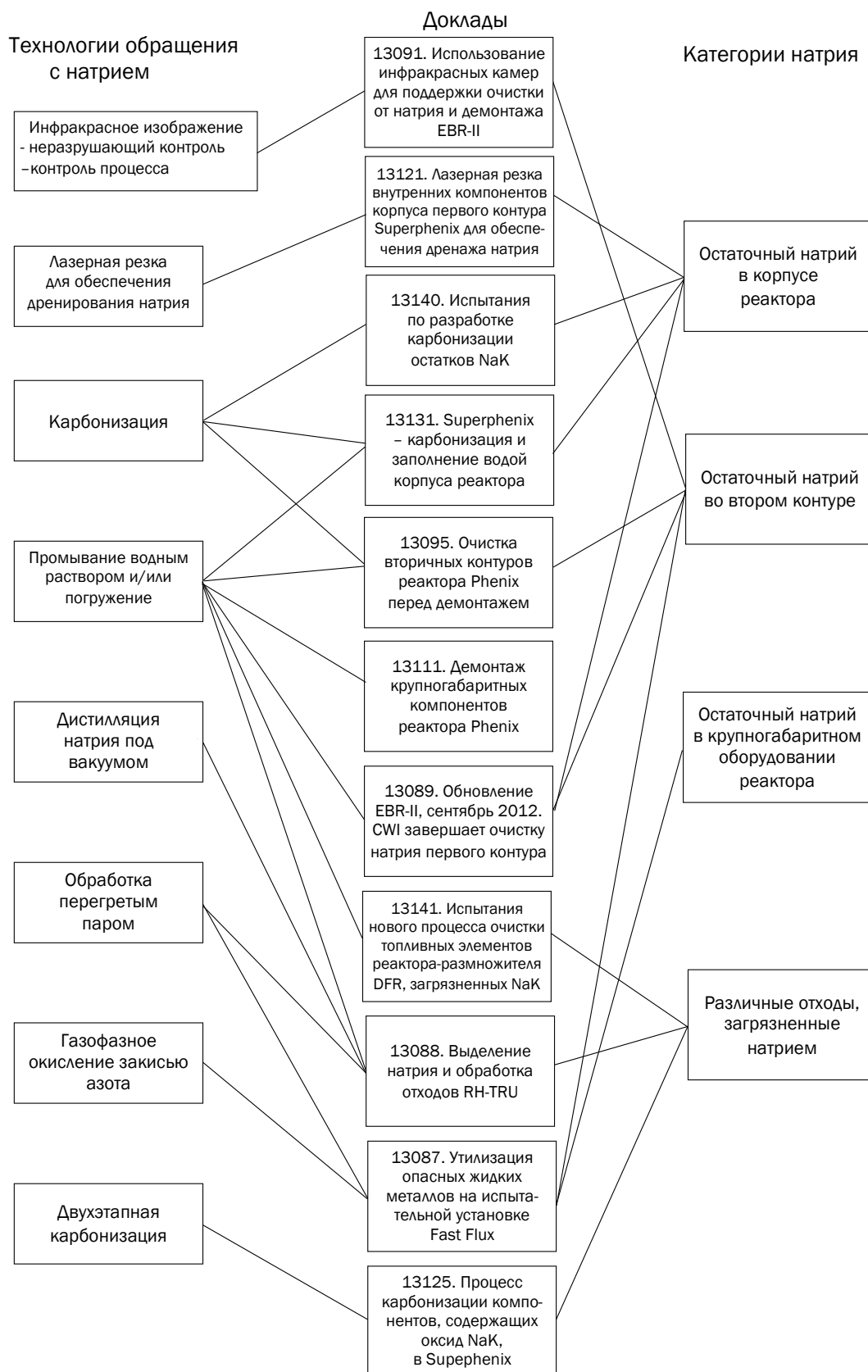


Рис. 1. Схема взаимосвязи технологий переработки натрия и категорий натриевых отходов, представленных на сессии МАГАТЭ конференции в Авиньоне в 2013 г.

2. Категории натрий-загрязненных отходов

Натрием и сплавом NaK загрязнены следующие категории отходов:

- корпус реактора (остаточный натрий);
- второй контур (остаточный натрий);
- крупногабаритное оборудование реактора (остаточный натрий);
- разные натрий-загрязненные отходы.

Для безопасного и эффективного удаления натрия и NaK должны быть тщательно изучены механизмы взаимодействия натрия и NaK с водой. Главной целью участия в конференции в Авиньоне было содействие пониманию и сбор информации для данного отчета. На рис. 2 схематично показана взаимосвязь между различными категориями натрий-содержащих отходов и порядком разделения, обработки и путями удаления этих отходов.

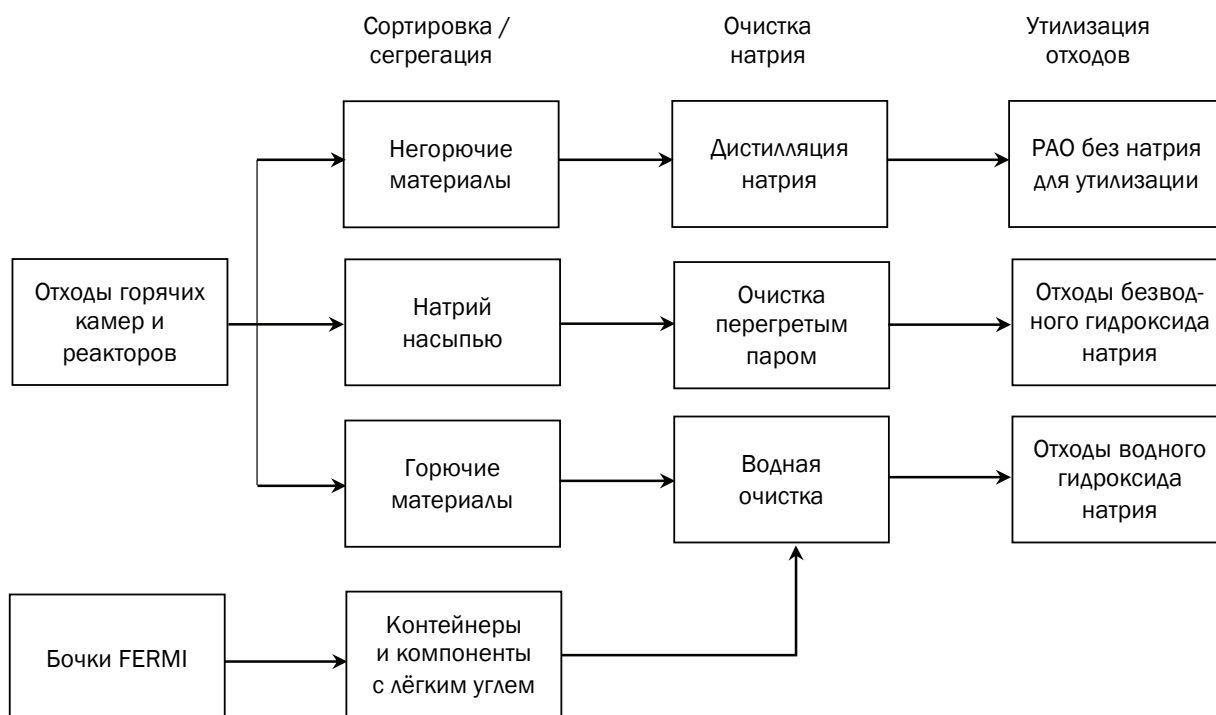


Рис. 2. Взаимосвязь между различными категориями натрий-содержащих отходов и порядком разделения, обработки и путями удаления этих отходов

Натрий

Натрий относится к группе щелочных металлов и имеет яркий, серебристый блеск, который быстро тускнеет, образуя белый налет гидроксида натрия и карбоната натрия. Металлический натрий не встречается в природе, он производится из его природных соединений. Из-за своей высокой теплопроводности ($\lambda = 132$ Вт/м·К) натрий имеет широкое применение. Как и все щелочные металлы, натрий экзотермически реагирует с водой и влагой в

воздухе. При взаимодействии натрия с водой выделяется едкий дым и взрывоопасный газ (водород). Такое сочетание может привести к опасным реакциям с повышением давления. Кроме того, достаточно большие части расплава могут взрываться.

Сплавы натрий + калий

Любой сплав NaK принадлежит к группе щелочных металлов. При контакте с воздухом или водой, NaK реагирует таким же образом, как и натрий. Его основное отличие от натрия является то, что он плавится при температуре минус 12,6 °С. Сплав NaK близкого к эвтектике состава (78 % K – 22 % Na) используется для теплообмена, газоочистки, в волновых датчиках и в качестве барьера на гидравлических клапанах сброса давления.

Технологии обращения с натрием

В настоящее время не существует ни одной единой технологии обращения с натрием, которая могла бы обрабатывать все различные формы натрий-содержащих отходов. Технологии обращения, представленные на конференции и показанные на рисунке 1, следующие:

- мониторинг с использованием инфракрасной техники и неразрушающих методов контроля;
- лазерная резка для обеспечения дренирование натрия;
- процесс карбонизации;
- промывка водным раствором и / или погружение;
- обработка водяным туманом;
- обработка перегретым паром;
- парогазовая отмывка;
- двухэтапная карбонизация;
- твердофазное окисление;
- газофазное окисление закисью азота.

Современные методы удаления натрия, используемые на каждом реакторе, в зависимости от стран, приведены ниже.

США:

- экспериментальный реактор-размножитель EBR-II, штат Айдахо, США. Использование обработки водяным туманом, перегретым паром, водяным душем (ASWS) с применением инфракрасной техники для визуализации контроля процесса внутри закрытого реакционного объема;
- высокопоточный опытный быстрый реактор FFTF, Вашингтон, США. Представляет собой трехпетлевой жидкометаллический опытный реактор

мощностью 400 МВт. Отмывка оборудования парогазовой смесью и перегретым паром.

Франция:

– экспериментальный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем Phenix, Маркуль, Франция. Очистка второй петли перед демонстрацией с использованием процесса карбонизации и последующей циркуляцией пароводяной смеси для промывки труб и очистки от карбонатов натрия.

– АЭС Суперфеникс, Крей-Мальвиль, Франция. Лазерная резка оборудования первого контура для обеспечения слива натрия; применение процесса карбонизации для обработки оборудования, содержащего окисленный NaK; применение процесса карбонизации и затопление водой корпуса реактора Суперфеникс.

Шотландия:

– прототип быстрого реактора (PFR), Берчвуд, Уоррингтон, графство Чешир, Шотландия. Применение парогазовой отмывки, процесса карбонизации; экспериментальные исследования процесса карбонизации для уничтожения остатков NaK.

– быстрый реактор Dounreay (DFR), Берчвуд, Уоррингтон, графство Чешир, Шотландия. Испытания нового способа очистки загрязненных NaK топливных элементов в следующей последовательности обработки: распыление мелкодисперсной воды (водяной туман), водяной душ, полное погружение в воду и цикл сушки. Все осуществляется в специальном химическом реакторе.

Россия:

– исследовательский быстрый реактор БР-10, Обнинск, Россия. Твердофазное окисление объемного (сдренированного) Na, NaK шлаком медеплавильного производства, газофазное окисление остаточного Na, NaK (например, холодные ловушки окислов) закисью азота (N_2O).

3 Экспериментальный реактор-размножитель EBR-II, США

На EBR-II (рис. 3), расположенном в комплексе INL, реализован проект вывода из эксплуатации. EBR-II эксплуатировался с 1964 по 1994 годы. В качестве теплоносителя первого и второго контуров использовался натрий (более чем 350 м^3). Сплав NaK также использовался в системах охлаждения EBR-II. Для завершения вывода из эксплуатации систем первого контура, согласно действующей нормативной документации, требовалось удалить остаточный натрий, а системы промыть водой. Опасность в том, что натрий довольно энергично реагирует с водой с выделением взрывоопасного водорода.

До обработки водой большинство систем первого и второго контуров подверглись пассивации. Это процесс нейтрализации натрия с помощью

влажной газообразной двуокиси углерода. Была нейтрализована большая часть щелочного металла, однако внушительное количество все ещё оставалась в трубопроводах в виде слоя бикарбоната натрия (NaHCO_3). Этот 4-дюймовый слой (рис. 4), покрывающий верхнюю часть натрия, находящегося в корпусе реактора, представляет дополнительные трудности для обработки.



Рис. 3. Внешний вид площадки реактора EBR-II



Рис. 4. Участок треснувшего 4-дюймового слоя бикарбоната натрия в баке первого контура реактора EBR-II

Термическая дистилляция для удаления натрия

Для удаления натрия из невзрывоопасных отходов была разработана установка термической дистилляции (рис. 5). Здесь отходы нагреваются до высоких температур под вакуумом, при этом происходит выпаривание натрия. Натриевые пары конденсируются в области более низкой температуры в накопительной емкости, из которой натрий передается для нейтрализации на участок обработки перегретым паром.

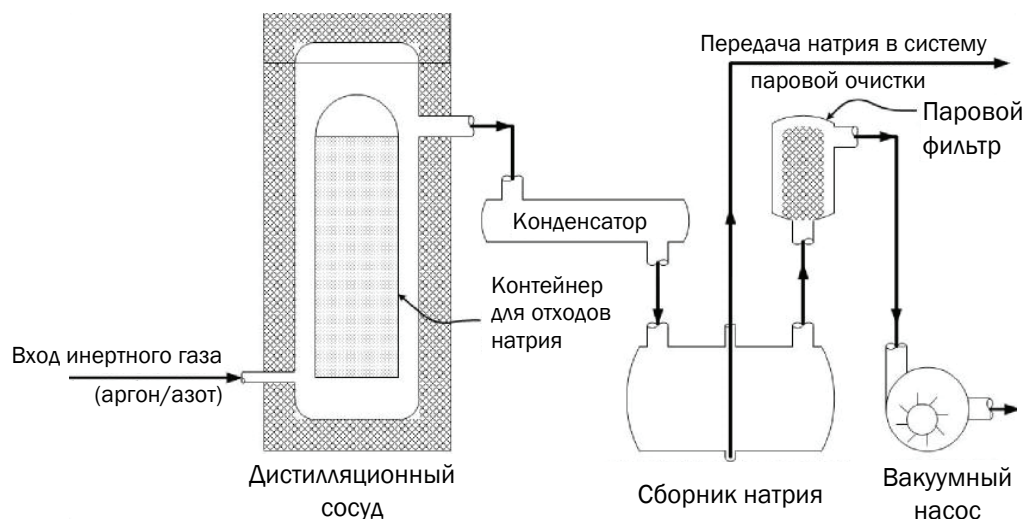
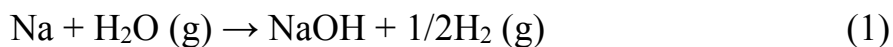


Рис. 5. Схема установки термической дистилляции на реакторе EBR-II

Обработка объёмного натрия перегретым паром

Система обработки перегретым паром предназначена для приема и переработки объемного натрия реактора EBR-II (рис. 6). В этой системе натрий подвергается взаимодействию с перегретым паром. Этот хорошо понятный процесс проведения реакции металлического натрия с водой с образованием гидроксида натрия и водорода представлен уравнением (1):



Система отмывки водяным туманом (ASWS)

ASWS предназначена для обработки горючих материалов, контейнеров и оборудования, которые содержат плёнку натрия. Состоит из ёмкости, которая спроектирована на максимальный уровень давления во время водной отмывки. Ёмкость имеет достаточно большой люк, чтобы разместить и закрепить 200-литровую бочку. В эту ёмкость также могут быть загружены и меньшие по габаритам горючие отходы. После того, как отходы загружены в ёмкость, её герметизируют и продувают азотом. Следующим этапом отмывки является заполнение донной части ёмкости водой. Затем сверху

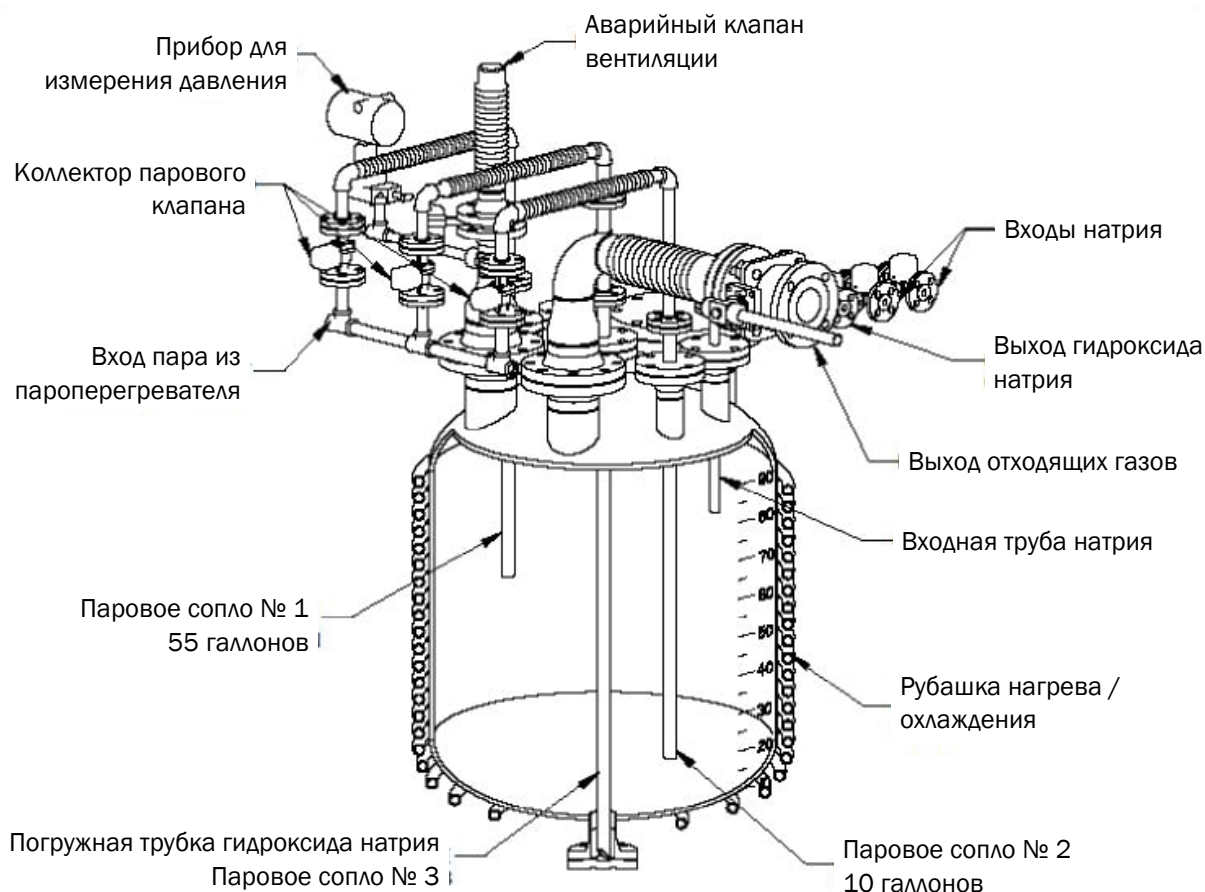


Рис. 6. Конструкция участка отмытки перегретым паром на реакторе EBR-II

распыляют воду. Завершение обработки натрия будет определено путём контроля концентрации водорода в отходящем газе.

На ASWS нейтрализуют и удаляют натрий из сдренированных натриевых контейнеров (например, контейнеры из плавильной станции) путем распыления воды. Процесс проходит в инертной атмосфере для предотвращения вероятной водородно-кислородной реакции. Отработанная вода может быть использована повторно, до предельного солевого и/или радиоактивного загрязнения. Отходящий газ из ASWS проходит через охлаждающий теплообменник, скруббер и высокоэффективный воздушный фильтр для охлаждения отходящих газов, удаления аэрозолей гидроксида натрия и фильтрации отходящих газов.

Обработка отходов в ASWS дистанционная, открытая и доступная, с известными объёмами натрия. Реакция контролируется концентрацией солей в водном растворе и регулируется через коллектор, предназначенный для переключения между подачей воды и азота. Азот поддерживает инертную рабочую среду и сдувает водород из ёмкости в процессе обработки. После завершения обработки в ёмкость через коллектор обеспечивают подачу

нагретого воздуха, чтобы высушить компоненты системы и заменить азотную атмосферу на воздух.

Система обработки отходящих газов

В процессе обработки перегретым паром на ASWS выделяется значительное количество отходящего газа, который необходимо очистить до атмосферного фона. Отходящий газ включают в себя водород, аэрозоли (например, продукты реакции натрий-вода), радиоактивные загрязнения, непрореагировавшие пары воды и азот. Система обработки отходящих газов фильтрует опасные компоненты отходящего газа при сохранении низкой концентрацией кислорода в среде для предотвращения водородно-кислородного взаимодействия.

4 Высокопоточный опытный быстрый реактор FFTF, США

FFTF расположен в Хэнфорде, штат Вашингтон. Этот реактор на натриевом теплоносителе мощностью 400 МВт имеет три экспериментальные петли. Накопленные отходы щелочного теплоносителя составляют 900 тонн, 500 из которых радиоактивные. Удаление остаточного натрия составляет главную часть стоимости вывода из эксплуатации реактора и оценивается приблизительно в 120 млн \$ USA. Презентация в Авиньоне основана на деталях очистки экспериментальной петли CRCTA (контур испытаний композитных реакторных материалов) (рис. 7). Петля CRCTA была специально подготовлена для отработки методов в обоснование применения их при окончательном выводе из эксплуатации FFTF.

С середины 1990-х годов на реакторе FFTF использовались и отрабатывались различные технологии для удаления остаточного недренируемого натрия, а именно: парогазовая отмывка, обработка перегретым паром, аммиаком и процесс карбонизации. Было установлено, что наиболее подходящими технологиями для применения в FFTF являются обработка парогазовой смесью и перегретым паром.



Рис. 7. Контур испытаний композитных реакторных материалов (CRCTA) при отработке технологий отмывки для компонентов реактора FFTF

Парогазовая отмывка

Технология парогазовой отмывки основана на обработке остаточного слоя натрия водяным паром в защитной среде азота. После окончательного останова реактора FFTF были демонтированы и успешно обработаны с применением данной технологии некоторые труднодоступные нерадиоактивные натриевые системы. Недостатками являются: возможные «хлопки», повышение давления и длительное время обработки.

Обработка перегретым паром

Обработка перегретым паром применялась для удаления натрия с внутренних поверхностей петли CRCTA. CRCTA — цилиндрический контур, который является одним из трех петель реактора FFTF. Приблизительно 350 литров металлического натрия оставалось в CRCTA после дренирования. Существенные количества этого натрия находились на дне контура и между тепловыми отражателями в верхней части. В процессе обработки контур нагревали до $\sim 210^{\circ}\text{C}$, продували азотом и производили периодический впрыск смеси перегретого пара и азота. Время реакции ~ 8 часов, при этом вентиляционный газ содержал 30–36 % водорода по объему. После успешного удаления остаточного натрия из петли CRCTA, обработку перегретым паром было решено использовать для отмывки холодных ловушек окислов (ХЛО).

На основании хороших результатов процесс обработки остаточного натрия перегретым паром использовался при обработке большой нерадиоактивной холодной ловушки и ее теплообменника на инженерной установке недалеко от Питтсбурга, штат Пенсильвания. Все работы были завершены безопасно и эффективно.

Примерно 2 года спустя, процесс обработки перегретым паром использовался для очистки остаточного NaK в системе охлаждения хранилища отработанного ядерного топлива. Система охлаждения состоит из большой трубы, встроенной в большой натриевый канал, двух емкостей и соединительных трубопроводов. В результате весь остаточный NaK был полностью удален, и система охлаждения была полностью очищена с помощью обработки перегретым паром. Небольшое возгорание водорода, не относящееся к обработке перегретым паром, произошло во время подготовительных работ.

Положительный опыт использования процесса обработки перегретым паром привел к следующим выводам:

1. Из-за отсутствия накопления влаги (натриевые системы в процессе обработки остаются горячими, обычно выше 200°C) не происходит никаких хлопков или ударов.

2. Относительно короткое время обработки показало оценочную скорость реакции от 22 до 70 кг щелочного металла в час.

3. Вся обработка была завершена безопасно и эффективно, без непредвиденных происшествий.

Все работы по отмывке оборудования были выполнены на нерадиоактивном Na и NaK.

5 Реактор Phenix, Франция

Phenix — экспериментальный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, который начал свою работу в 1974 году в Центре Маркуль. Его окончательный останов произошел в конце 2009 года.

Трубопровод второго контура

При выводе из эксплуатации реактора Phenix (рис. 8) перед демонтажем необходимо провести дренирование и обработку оборудования трех петель 2-го контура, в которых использовался натриевый теплоноситель, в том числе клапана, трубопровод большого диаметра и оборудование, содержащее асбест. После слива натрия из основного трубопровода, петли эксплуатируются таким образом, чтобы позволить ещё один слив остаточного натрия. Затем трубопровод обрабатывается при помощи процесса карбонизации для нейтрализации остатков натрия. В завершении производится окончательная промывка водой.

Дренирование остаточного натрия

После основного слива натрия, в каждой из петель находится примерно по 700 кг остаточного натрия. Некоторое количество находится внутри оборудования, например в гидравлических клапанах. Удаление щелочного металла из этого оборудования путем карбонизации или водной промывки невозможно, т. е. для обработки подобного оборудования должны применяться другие технологии. Значительное количество натрия остается в трубопроводах большого диаметра, которое также сложно оценить. Для дренирования этого натрия должны быть установлены новые линии слива.

Основными требованиями для выполнения этих операций являются:

- избегать попадания воздуха, которое может привести к возгоранию натрия;
- отслеживать места «холодной точки», которые не позволяют эффективно слить натрий;
- резку и сварку больших натриевых трубопроводов проводить в корпусе реактора;

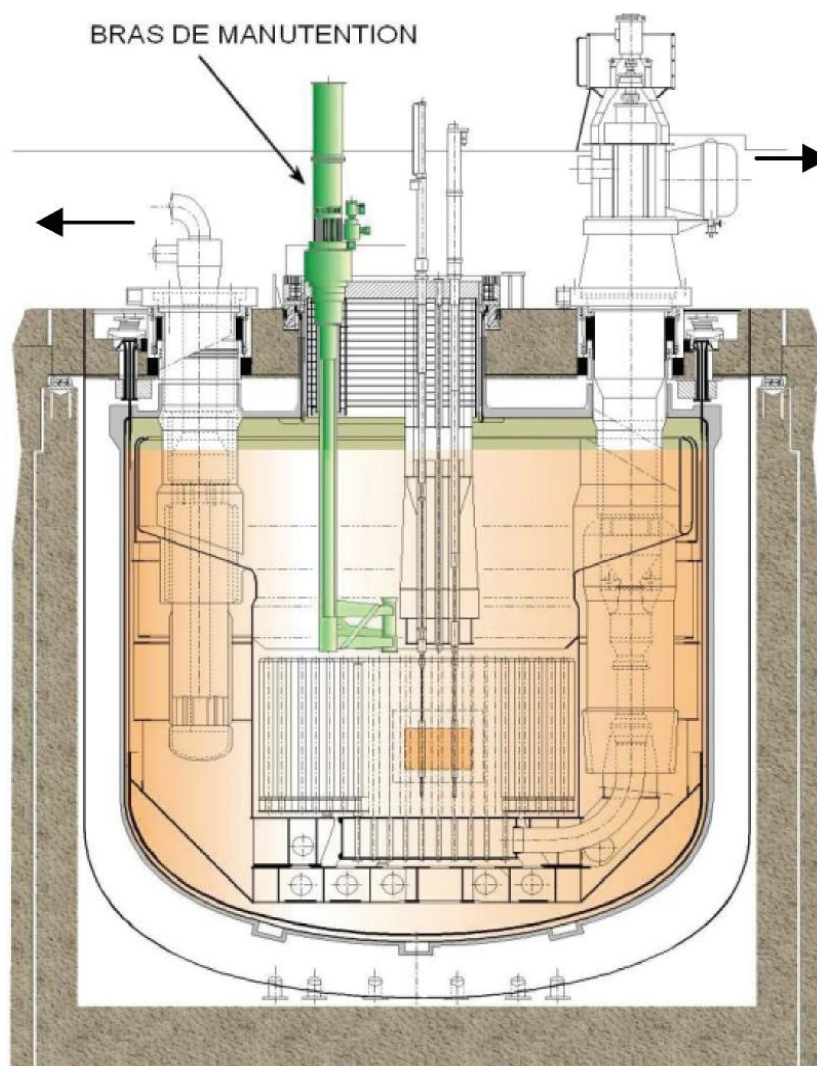


Рис. 8. Сечение реактора Phenix

- демонтировать все оборудование, содержащее асбест;
- тщательно провести программу удаления остатков натрия.

Процессы карбонизации и водной промывки

Процесс карбонизации заключается в циркуляции смеси азота, диоксида углерода и пара в контуре реактора, чтобы в процессе переработки получить карбонат натрия (Na_2CO_3). Условия процесса определялись экспериментально, с контролем концентраций воды в парообразном состоянии, водорода и трития. Основными трудностями для осуществления этой операции являются:

- разнообразие исполнения оборудования (например, баки, трубопроводы диаметром от 1 до 20 дюймов);
- поддержание заданной температуры трубопровода во избежание конденсации воды;

- технологическое оборудование для проведения процесса должно быть легко перенесено с одной петли на другую;
- обеспечение управления сбросами газов в атмосферу.

Процесс водной промывки заключается в циркуляции воды в трубопроводах для растворения и удаления карбонатов натрия. Основными трудностями для осуществления этой операции являются:

- управление реакцией натрий/вода (экспериментальная программа проводится для изучения конкретных количеств остаточного натрия);
- избегать случайного (неуправляемого) контакта натрия с водой;
- переработка вторичных жидких отходов;
- технологическое оборудование для проведения процесса должно быть легко перенесено с одной петли на другую;
- обеспечение управления сбросами газов в атмосферу.

Демонтаж крупногабаритного оборудования

Операции по выводу из эксплуатации также включают в себя демонтаж и обработку большого съёмного оборудования, такого как: насосы первого контура, промежуточные теплообменники и модели промежуточного теплообменника (DOTE). DOTE заменяет промежуточный теплообменник, чтобы: (1) изначально заглушить плиту, предназначенную для теплообмена, обеспечивая радиационную защиту, и (2) создать герметичный объём между горячим и холодным бассейнами с подушкой аргона.

Модель промежуточного теплообменника представляет собой цилиндр высотой 7 метров и диаметром 1,7 метра и весом в общей сложности 16 тонн. Необязанный трубопроводом снаружи корпус модели выполнен из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. В верхней части корпуса находится тепловая защита, состоящая из трех слоёв металла (один из нержавеющей стали и два меди). Стальная защита, установленная в этой верхней части, обеспечивает радиационную защиту. Нижняя часть корпуса модели имеет цилиндрическую форму и обеспечивает герметичность между верхней и нижней частью модели. Корпус модели теплоизолирован и находится в герметичном контейнере.

Этапы процесса

До 2009 года все крупногабаритное оборудование было демонтировано и упаковано в металлические контейнеры в соответствии с уровнем низкоактивных и промежуточных отходов. Операции, связанные с демонтажем такого оборудования, требуют значительных временных затрат, из-за чего неизбежно радиационное воздействие на персонал. Чтобы уменьшить

дозовые нагрузки и снизить стоимость обработки оборудования, модель DOTE была отправлена в CIRES (хранилище низкоактивных отходов).

Перечень операций, проведенных при демонтаже крупногабаритного оборудования.

1. Резка тепловой защиты. Оборудование разрезают, промывают в боксе дезактивации, проводят радиологические измерения для определения соответствующего типа упаковки.

2. Промывка и дезактивация оборудования. Оборудование передают в шахту промывки (рис. 9), где оно подвергается ряду промывочных операций, чтобы удалить остатки натрия. Процесс промывки постепенно нейтрализует остаточный натрий с использованием воды в виде аэрозолей, формируемых газом-носителем (CO_2), который способствует нейтрализации гидроксида натрия путем преобразования его в карбонат. После прямого распыления пара оборудование сушат подогретым азотом и проводят визуальный осмотр. Бассейны дезактивации предназначены для смыва радиоактивного загрязнения с поверхностей оборудования.

3. Определение характеристик. Картограмма мощности дозы загрязнения оборудования составляется сотрудниками Phenix Services des Programmes et du Reseau с указанием площадей повышенных доз. После промывки оборудования, по показаниям гамма-спектрометра в заданных точках (рис. 10)

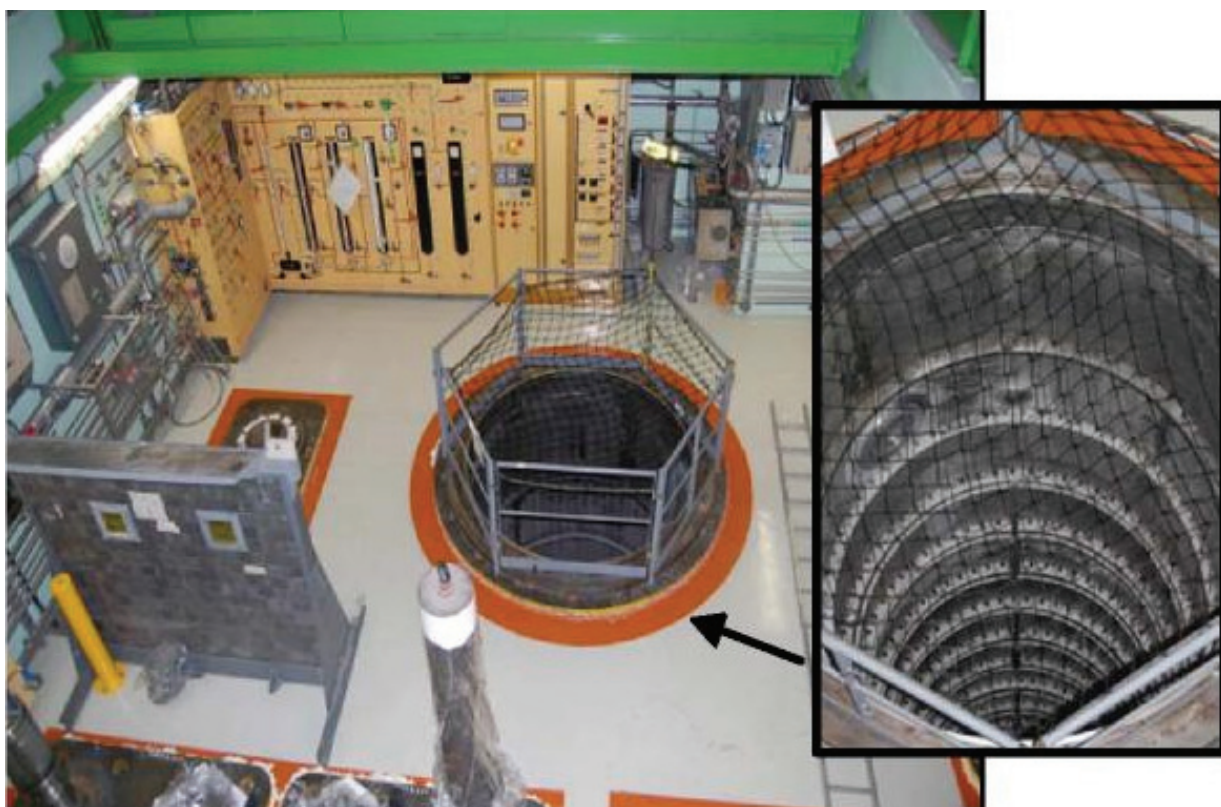


Рис. 9. Установка водной отмывки на реакторе Phenix

определяется уровень радиационного загрязнения отходов (низкоактивные или смешанные) для выбора способа дальнейшего обращения с данным оборудованием. Модель DOTE 4776 в целом имеет низкий уровень активности и будет обрабатываться как отдельная часть.

4. Получение файла ANDRA. Приём единицы оборудования в хранилище низкоактивных отходов предполагает значительные подготовительные работы. Совместно с Agence Nationale Pour La Gestion Des Déchets Radioactifs (ANDRA) были обсуждены процедуры обработки, характеристики этапов и тип требуемой транспортировки. Все эти данные по единице оборудования объединяются в соответствующий файл персоналом реактора и ANDRA.

5. Подготовка оборудования. Оборудование устанавливается вертикально в зале обращения с металлическими конструкциями. Для облегчения веса оборудования из верхней части извлекают свинцовую дробь (биологическая защита). Оборудование затем устанавливается горизонтально с помощью крана и кантователя и отправляется в бокс обработки.

6. Оснащение одной части. Поскольку DOTE в основном имеет полые объёмы, отходы будут оставаться внутри оборудования, заполняя их. Для более равномерного распределения натрия по оборудованию, модель подвергается вибровоздействию. Затем для получения радиологических характеристик из корпуса удаляется аргоновый колпак. Входные и вентиляционные отверстия выполнены так, чтобы позволить дренаж раствора в процессе обработки в хранилище отходов. В металлической крышке устанавливаются места крепления строп. Проектная документация разработчика определяет тип подъёмного механизма и стропы, которые будут использоваться, а также их расположение на оборудовании.

7. Доставка 20-футового контейнера ISO в CIRES невозможна, учитывая длину блока (более 19 м). Требуется специальная транспортировка.



Рис. 10. Точки измерения радиологических характеристик модели промежуточного теплообменника (DOTE) реактора Phenix

Результаты процесса

Требовалось максимально освободить оборудование от натрия, чтобы провести необходимые процедуры для кондиционирования отходов и упаковать в подходящую тару. Крупногабаритное оборудование обрабатывается с учетом приобретенного опыта на реакторе Phenix с 2010 года. А именно: (1) ограничение количества резов (снижение уровня облучения персонала) и выполнение их соответствующим инструментом (например, проволочная пила), (2) оптимизация определения активности (получение как можно более точных радиологических характеристик), (3) предпочтительна транспортировка отдельных частей и (4) оптимизация объемов.

Выводы

Обработка оборудования как отдельной части может рассматриваться только в том случае, если загрязнение соответствует уровню низкоактивных отходов. Для реактора Phenix предпочтительнее было бы отправлять модель DOTE как единую часть в хранилище низкоактивных отходов.

6 Реактор Superphenix, Франция

Дренаживание натрия и обработка первого контура реактора

Вывод из эксплуатации реактора Superphenix включает процедуры: слив теплоносителя первого контура, резка оборудования и слив остаточного натрия после первичного слива натрия. Затем выполняется обработка контура технологией карбонизации и затопление реактора, чтобы устранить риск возгорания натрия при окончательном демонтаже.

После слива натрия из первого контура реактора Superphenix остаются некоторые количества натрия («лужи»), которые не могут быть удалены с помощью основных электромагнитных насосов. Некоторые из них расположены в области соединений насосов и трубопроводов, так называемые LIPOSO. Они представляют собой довольно значительное количество натрия, которое может поставить под угрозу дальнейшее заполнение водой внутреннего оборудования реакторного блока. Поэтому было решено разработать дистанционное устройство лазерной резки отверстий в оборудовании (CHARLI), чтобы позволить слить «лужу» натрия (рис. 11).

И, наконец, промывка и затопление оборудования позволяет обработать остаточное количество натрия и удалить его в соответствии с имеющимися системами утилизации отходов.

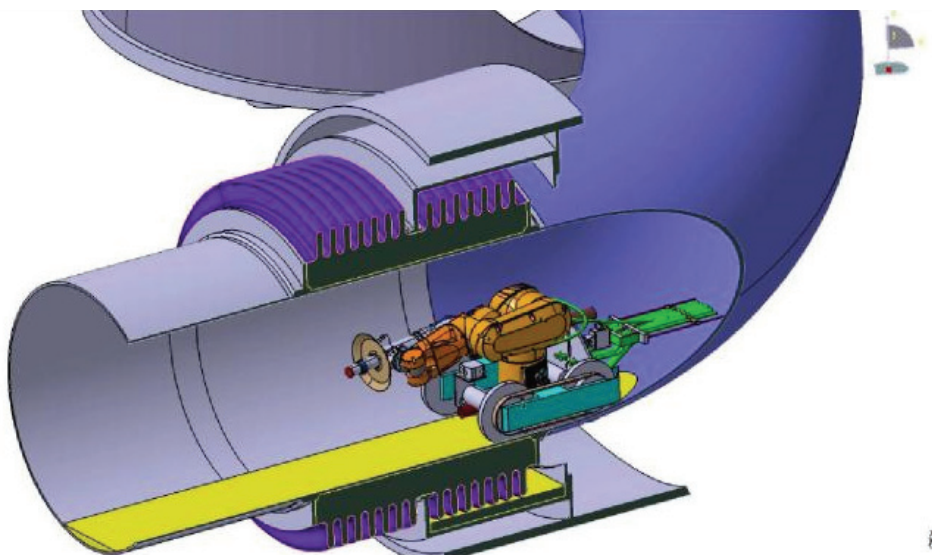


Рис. 11. Роботизированное устройство для лазерной резки с дистанционным управлением (CHARLI)

NaK-содержащее оборудование

Три единицы оборудования реактора в Creys-Malville содержат окисленный NaK. Первый из них представляет собой барботёр, предназначенный для очистки газовой рабочей среды первого контура (рис. 12). Второй — гидравлический клапан.

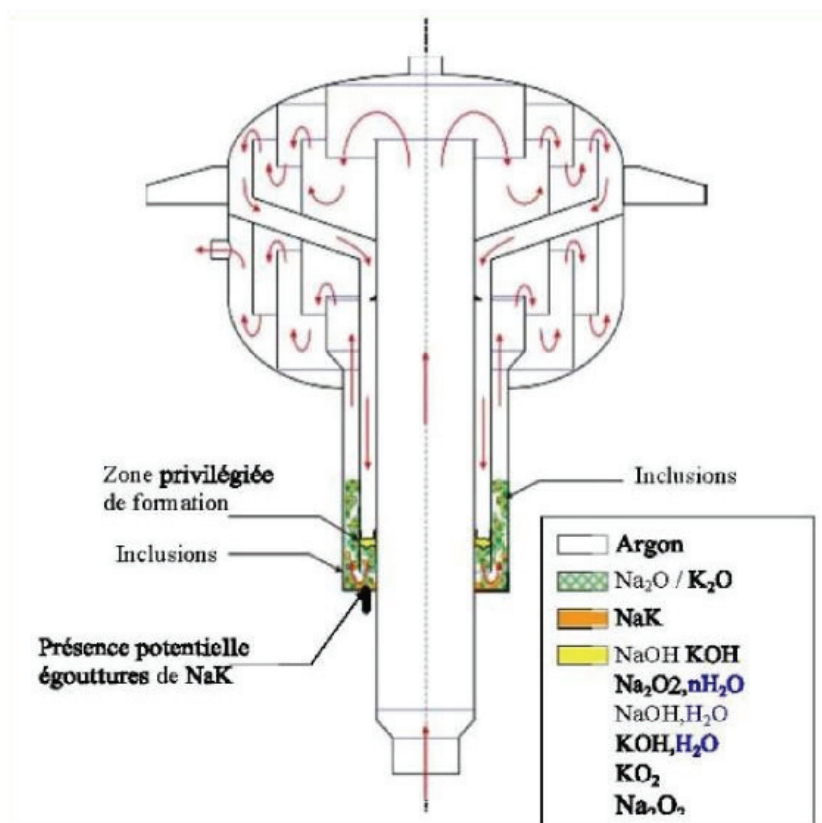


Рис. 12. Разрез барботера и клапана, содержащего NaK

В гидравлическом клапане, как правило, NaK не окисляется, но в конкретном случае окисление произошло вследствие случайного попадания воздуха в рабочую атмосферу во время эксплуатации станции. Также NaK находится в температурном компенсаторе VISUS. Как и в гидравлическом клапане, окисление NaK в VISUS было вызвано случайным попаданием воздуха.

Это оборудование было обработано перед демонтажем в 2016–2018 гг. Поэтому задачи на реакторе Superphenix заключались в разработке способа обработки элементов, содержащих окисленный NaK. А именно:

- 1) нейтрализовать NaK и продукты его окисления;
- 2) управлять потенциальными выбросами кислорода, воды и водорода;
- 3) разработать процесс, который может быть промышленно применен;
- 4) отслеживать ход обработки.

Лазерная резка внутреннего оборудования первого контура

При подготовке к выводу из эксплуатации реактора Superphenix, натрий был слит из первого контура реактора. Однако остается некоторое количество натрия («лужи»), которое не может быть удалено с помощью основных электромагнитных насосов (рис. 13). Эти лужи с остаточным натрием, называемые LIPOSO, локализованы в основном в трех местах трубопровода диаметром 850 мм, по которому циркулирует теплоноситель при эксплуатации реактора:

- нижняя часть трубы, слой натрия толщиной около 30 мм
- сильфон вокруг каждой трубы, толщина натрия от 90 до 160 мм;
- частично заполнен кожух вокруг сильфонов, толщина натрия около 100 мм.

Общий объем этого натрия составляет 2,7 м³, который находится в восьми различных областях (два LIPOSO в трубопроводе каждой из четырех петель первого контура реактора). Кроме того, натрий загерметизирован в сильфонах, которые не позволяют провести визуальный осмотр и провести очистку посредством карбонизации.

Решено было разработать способ, который позволил бы производить резку стальных конструкций внутри первого контура реактора для слива натрия. Чтобы получить доступ к LIPOSO во внутреннем оборудовании реактора без их демонтажа, было выбрано роботизированное устройство с дистанционным управлением CHARLI, предназначенное для выполнения лазерной резки в нижней части реактора. Ряд разработок ведется для проверки CHARLI при работе в особых условиях первого контура, в том числе с высоким уровнем радиации, высокой температурой и в среде защитного газа аргона, а также возможного появления паров натрия и аэрозолей в процессе резки.

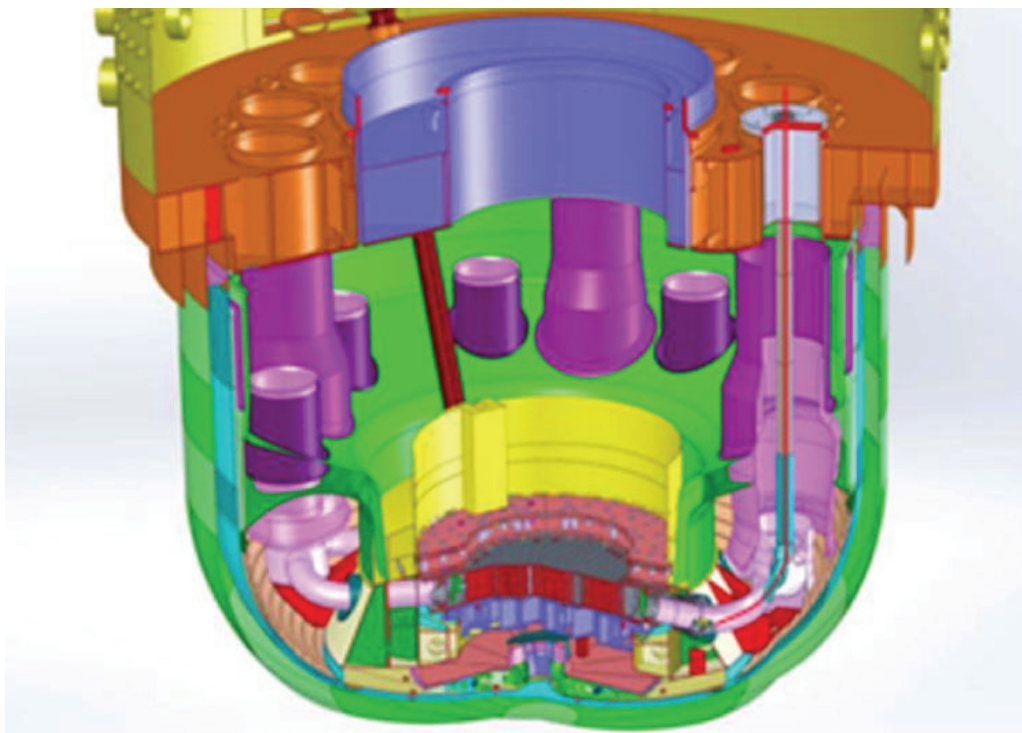


Рис. 13. Разрез реактора Superphenix, показывающий LIPOSO

Роботизированное устройство с дистанционным управлением CHARLI и лазерная резка

CHARLI имеет лазерный резак, видеокамеры и датчики, благодаря которым робот попадает в заданную область. В связи с ограниченной грузоподъемностью головного манипулятора, были разработаны специальные лазерные резаки с уменьшенным весом до 2,5 кг (вместе с охлаждающей жидкостью, видеокамерой, защитным щитком от натрия, датчиком аэрозолей и устройством от падения).

Карбонизация и затопление водой первого контура реактора

Корпус реактора затапливается для устранения риска возгорания натрия во время проведения работ первого этапа демонтажа (т. е. устранение радиологической опасности за счет слива основного натрия и рисков, связанных с возгоранием натрия, за счет осушения и затопления корпуса).

Водная отмывка и затопление позволяет: (1) безопасно обращаться с остаточным натрием и (2) эффективно отмыть оборудование в соответствии с имеющимися системами утилизации отходов.

Обработка NaK-содержащего оборудования

Остаточный NaK в Superphenix присутствует в барботере (второстепенное оборудование), гидравлическом клапане (основное оборудование) и в VISUS (основное оборудование). Эти элементы были обработаны перед

предстоящим демонтажем в 2016–2018 гг. Количество NaK и его оксидов, содержащихся в этих элементах, оцениваются следующим образом:

– элемент 1: барботер (второстепенное оборудование) — NaK < 1 кг, NaK оксиды < 114 кг; Na₂O₂ < 3 г; KO₂ < 4 г;

– элемент 2: гидравлический клапан (основное оборудование) — NaK < 1 кг, NaK оксиды < 68 кг; KO₂ < 110 г, вода в гидратированном виде < 380 г;

– элемент 3: VISUS (основное оборудование) — NaK < 1 кг, NaK оксиды < 1 кг.

На воздухе NaK быстро окисляется и воспламеняется, как только на нём слегка нарушена окисная пленка. Продукты горения при этом являются оксидами и пероксидами щелочного металла. Окисление начинается с формирования окислов, затем появляются пероксиды и надоксиды. Одной из особенностей NaK является то, что он образует некоторое количество надоксида калия, KO₂.

NaK рассматривается как окисленный после подтверждения наличия надоксидов, особенно KO₂. Много инцидентов и аварийных случаев показывают, что KO₂ играет решающую роль в выделении кислорода при термическом разложении. Очень высокий риск при обращении с NaK вызван его длительным окислением, который приводит к образованию KO₂ в сочетании с производными гидратации, образующимися в результате реакции натрия с влагой и кислородом, содержащимся в воздухе.

Программа испытаний процесса окисления NaK

Экспериментальная квалификационная программа отработки химических процессов, включающих процесс обработки NaK окислением, была разработана для двух экспериментальных компаний, проведенных в период с 2007 по 2010 гг.

Первая компания была проведена в 2007 году и была направлена на проверку процесса карбонизации и оценку кинетики окисления NaK (т. е. появление оксидов, надоксидов и перекиси водорода). Эти химические реакции проводились отдельно.

Вторая компания, запущенная в 2009 году, была направлена на подтверждение результатов первой компании по карбонизации KO₂, на проверку поведения пероксида натрия (Na₂O₂) и его щелочи, а также на изучение стадий взаимодействия системы оксиды + гидроксиды + гидраты с NaK. Вторая компания была завершена серией испытаний на полном процессе обработки (очистка влажной карбонизацией) на образцах окисленного NaK, полученных в Комиссариате по атомной энергии (CEA). Эти последние испытания были проведены при различных температурах.

7 Быстрые реакторы в Dounreay, Шотландия

Организация Dounreay Site Restoration Limited (DSRL) в настоящее время* проводит вывод из эксплуатации реакторов PFR и DFR в научно-исследовательском центре на севере Шотландии. Оба реактора использовали щелочной металл в качестве основного теплоносителя: натрий на PFR и NaK на DFR. Основная часть теплоносителя была удалена из обоих реакторов, но в настоящее время существует необходимость использовать химическую обработку остаточного щелочного металла на месте, чтобы перевести их в безопасное состояние. Основная цель данной обработки состоит в том, чтобы удалить или свести к минимуму необходимость поддержки инертной атмосферы в реакторе при последующем демонтаже. Приблизительно 1000 ТВС все ещё остаются в активной зоне DFR. Часть этих ТВС повреждены при эксплуатации реактора. Все топливные элементы покрыты пленкой NaK, которая осталась после дренирования реактора. Специалисты по топливным элементам разработали и построили специализированную площадку для удаления этого остаточного NaK и переупаковки ОТВС (рис. 14). Первый пуск этой установки был запланирован на 2014 г.

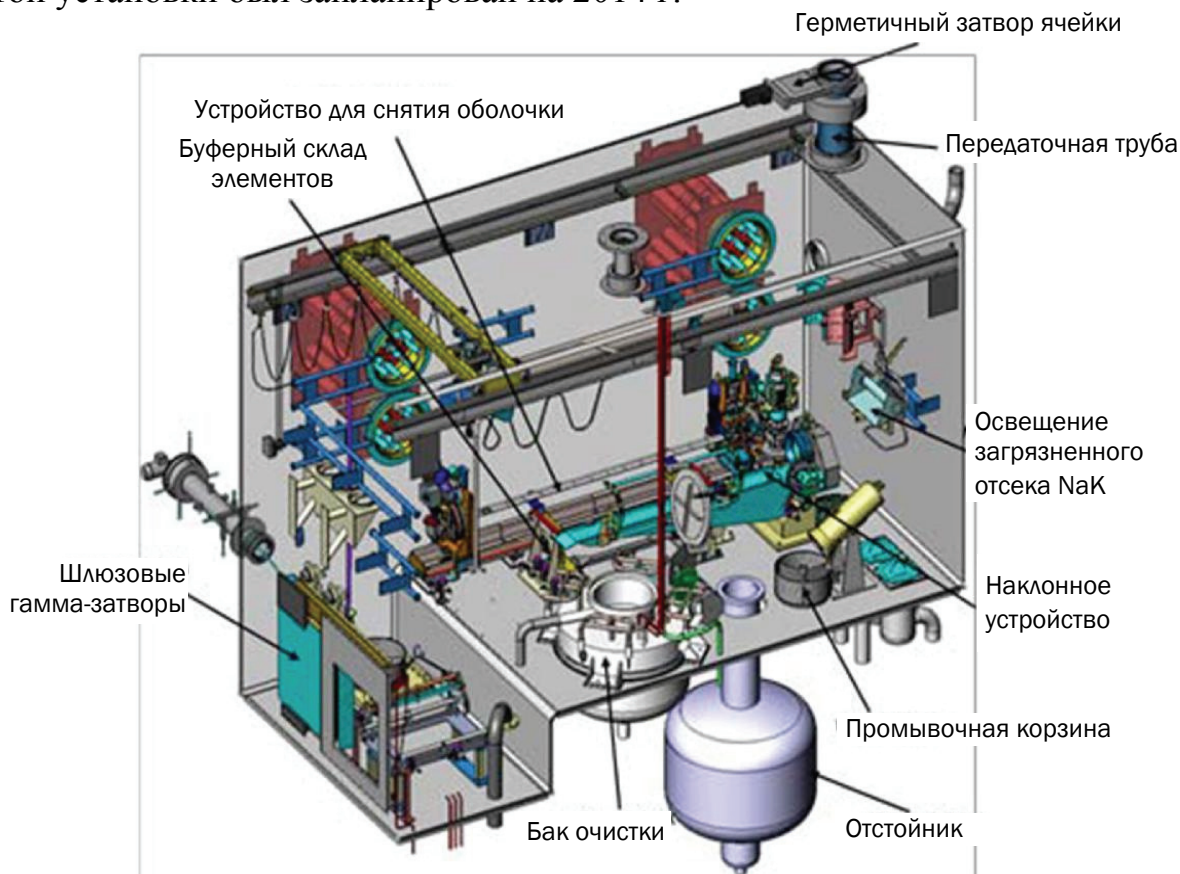


Рис. 14. Изображение площадки для удаления остаточного NaK и переупаковки ТВС

* Раздел написан на основании [12], [13]. Сведения относятся к 2013 г.

DSRL в настоящее время выполняет вывод из эксплуатации реактора DFR, в котором в основном использовался NaK в качестве теплоносителя.

Рассматриваются два этапа процесса. В обоих применяется процесс карбонизации. Хотя DSRL провели значительную программу разработки процесса парогазовой отмывки применительно к остаткам натрия и NaK, но все же считается, что процесс карбонизация может иметь потенциальное преимущество, которое должно быть подтверждено применительно к NaK. В частности, было рассмотрено удаление остаточного NaK в чрезвычайно сложной геометрии первого контура DFR.

Одним из ключевых моментов по отношению к удалению остатков щелочного металла, особенно в сложной геометрии, состоит в трудности определении окончания процесса. Другими словами, определения того, что с помощью применяемого процесса достигнуто конечное состояние процесса (т. е. полное или частичное химическое превращение в химически инертное состояние).

Тяжело установить наличие остатков в сложной геометрии, особенно тяжело установить толщину покрывающего оборудование слоя. Все это может привести к серьезным последствиям для любого последующего этапа демонтажа.

При рассмотрении использования процесса карбонизации в DFR, персонал DSRL решился на подход, который будет направлен на получения сухого твердого слоя карбоната / бикарбоната толщиной около 3 мм. Эта толщина была выбрана потому, что такой слой полностью бы прореагировал. Слой такой толщины должен остаться в хорошо сдренированных трубопроводах, обеспечивающих пассивацию значительного слоя натрия в более глубоких отложениях.

В отношении удаления остатков натрия значительные разработки процесса карбонизации проводились в CEA во Франции. Однако часть этой работы проводилась с твердым натрием. Типичные условия обработки процессом карбонизации были в диапазоне 40–60 °C с получением сухого продукта реакции. Используемый NaK сплав в Dounreay (Шотландия) был «реакторного класса», соотношение щелочных металлов в котором составляет 74 % (масс.) калия и 26 % (масс.) натрия.

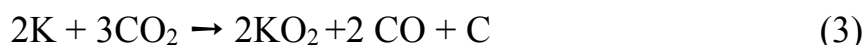
После остановки реактора большинство элементов первого контура поддерживались при температуре приблизительно 100 °C, чтобы сохранить NaK в расплавленном состоянии. Тем не менее со временем в периферийных частях температура может упасть ниже этого уровня, что приведет к некоторому выделению натрия из сплава, а это потенциально ведет к локализованным изменениям соотношения натрия / калия. В этих условиях NaK может

достичь эвтектического состояния (т. е. 22 % Na/78 % K), который остается в жидком состоянии вплоть до температуры примерно минус 13 °С. Следовательно, можно предположить, что NaK в DFR может быть в жидком состоянии для любой вероятной температуры обработки, тем самым создавая различные сценарии проведения карбонизации. Проводился анализ научно-технической литературы для поиска опубликованной работы, описывающей использование процесса карбонизации для обработки жидкого NaK, но никаких сведений не было найдено.

Поэтому были проведены некоторые экспериментальные разработки, чтобы понять влияние NaK на ход процесса.

Реакции NaK с углекислым газом

Литературное исследование выявило одну ссылку (Sherman, 2000), описывающую потенциально опасное взаимодействие NaK с сухим углекислым газом. Это связано с тем, что возможные продукты реакции могут включать надоксид калия KO_2 и калия карбонил $\text{K}_6(\text{CO})_6$, оба из которых являются потенциально взрывчатыми веществами при определенных условиях. В рамках подготовки к главному испытанию углекислотой было сочтено разумным осуществить начальные испытания с использованием NaK и сухого углекислого газа. Эти испытания были необходимы для устранения наиболее неблагоприятных условий обработки с потерей влажности диоксидом углерода. Основные реакции, которые были рассмотрены для этого исследования, представлены в уравнениях (2) — (4):



Несмотря на термодинамическую маловероятность этих реакций, процесс проводили под защитой технологического газа и использовались температуры процесса карбонизации в DFR, которые необходимо было подтвердить практическими испытаниями.

Определение температурных пределов

Были выполнены две тестовые программы для рабочей температуры от 60 до 90 °С, результаты которых приведены в таблицах 1 и 2 соответственно. Температура 60 °С была выбрана потому, что она превышает любые возможные условия обработки. Был сделан вывод, что, если никаких существенных реакций не наблюдалось при 60 °С, реакция не будет происходить и при более низких температурах. Кроме того, если начальные испытания при

60 °С не покажут образования монооксида углерода СО, то температура для второго испытания будет повышена до 90°С. Поскольку главным образом идет речь о реакции между калием и диоксидом углерода, считалось разумным заменить один из образцов, содержащий эвтектический сплав NaK, и подвергнуть воздействию 20 %-й двуокиси углерода. Один из образцов, содержащий калий, подвергнуть воздействию 100 %-й двуокиси углерода в качестве крайнего случая. Так как 100 %-й калий при 90 °С будет жидким ($T_{пл.} = 63\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение всего испытательного периода, было бы разумно провести сравнительные испытания с другими образцами. Результаты первых тестов при 60 °С не показали окиси углерода, и было принято решение перейти к испытаниям при 90 °С. Образцы щелочного металла подвергались воздействию газов в течение 6 недель. Газ анализировался еженедельно.

Таблица 1. Параметры испытаний при 60 °С на быстром реакторе Dounreay

Номер образца NaK/CO ₂	Весовое соотношение		Содержание газа-носителя	
	Натрий	Калий	%	Газ
1	22	78	100	CO ₂
2	22	78	20 80	CO ₂ N ₂
3 *	74	26	100	CO ₂
4 *	74	26	20 80	CO ₂ N ₂
5 *	74	26	100 % азот	

Таблица 2. Параметры испытаний при 90 °С на быстром реакторе Dounreay

Номер образца NaK/CO ₂	Весовое соотношение		Содержание газа-носителя	
	Натрий	Калий	%	Газ
6	22	78	100	CO ₂
7	0	100	100	CO ₂
8 *	74	26	100	CO ₂
9 *	74	26	20 80	CO ₂ N ₂
10 *	74	26	100 % азот	

* Данные приведены по информации авторов доклада [13].

Описание испытательного стенда

Для проведения исследований взаимодействия щелочных металлов с диоксидом углерода был спроектирован и построен испытательный стенд.

Пять герметичных сосудов с NaK по 200 г в каждом установлены в перчаточный бокс со смотровым стеклом с контролируемой температурой в инертной атмосфере (рис. 15). Каждый сосуд должен был выдержать давление смеси углекислого газа и азота. Использовались газы высокой чистоты.



Рис. 15. Внешний вид испытательного стенда на быстром реакторе Dounreay

Испытания при 60 °C

Давление внутри каждого из сосудов было зафиксировано в начале каждого периода выдержки и в конце перед отбором пробы. На линии между сосудами и манометрами при отборе проб было небольшое падение давления. Эти потери давления является одинаковым для всех сосудов, как для заполненных диоксидом углерода, так и для заполненных азотом.

Следует отметить, что в течение испытаний при 60 °C сосуды были пополнены в конце первого периода, так что изменение давления зафиксировано только для периода от 2 до 5 недель. Образование оксида углерода не было обнаружено ни в одном из сосудов в течение 5-недельных испытаний при 60 °C. Азот, двуокись углерода, окись углерода могут быть обнаружены на газовом хроматографе. По окончании испытаний образцы также анализировали на хроматографе Varian, который был предназначен для обнаружения водорода. Низкие уровни азота в образцах со 100%-м диоксидом углерода были обусловлены небольшими количествами воздуха, когда пробоотборник подключался к газовому хроматографу. Также был обнаружен низкий уровень кислорода. Низкий уровень примесей воздуха на этом этапе не повлиял на результаты измерений оксида углерода.

Испытания при 90 °C

Параметры испытаний образцов при 60 °C в смеси углекислого газа и азота были перенесены для испытаний при 90 °C. Дальнейшее изменение при 90 °C было повышение абсолютного давления до 1,2 бар. В начале предполагалось, что сосуды не будут пополняться газом в течение 5-недельного периода, отбора проб газа в течение этого периода будет снижать давление в сосуде. Давление 1,2 бар было выбрано, чтобы сохранить избыточное давление по отношению к атмосферному в течение испытательного периода. При любой небольшой протечке в ходе испытаний газ вытягивается через вентиляцию, а не остается внутри бокса, таким образом не загрязняя его.

Газы отбирали с помощью пробоотборника через соединительные трубки, затем открывали клапан таким образом, чтобы в пробоотборник поступало около 10 мл газа. Этот пробоотборник затем подключали к газовому хроматографу, на котором анализировали газ. Используемый газовый хроматограф Agilent Micro имеет две упакованные капиллярные колонки. Канал 1 (содержит молекулярный сетчатый фильтр) для определения водорода, кислорода, азота, метана и оксида углерода. Канал 2 выполнен в виде U-образного участка, который определяет диоксид углерода, водород и высшие углеводороды. В хроматографе использовались детекторы дифференциальной теплопроводности. При заданной температуре колонок и использовании гелия как газа-носителя, оксид углерода можно было обнаружить приблизительно через 180 секунд.

Поскольку ожидался нулевой выход оксида углерода, проводилась калибровка Agilent, чтобы определить нижний предел обнаружения оксида углерода. Калибровка была выполнена первоначально с оксидом углерода при растворимости 200 vppm в диоксиде углерода. Этот газ был постепенно разбавлен до уровня 50 vppm оксида углерода. Этот уровень постоянно измерялся и был с уверенностью принят как нижний предел диапазона измерений.

Поскольку используемый газ-носитель в этих испытаниях был гелий, то определить появление водорода было невозможно из-за близкой теплопроводности его с газом-носителем. Чтобы определить нижний предел обнаружения водорода, были взяты некоторые дополнительные образцы и измерены на газовом хроматографе Varian с газом-носителем аргоном. Но он не мог быть использован для определения оксида углерода одновременно, так как в колонке невозможно разделить компоненты воздуха от окиси углерода. Поступление небольшого количества воздуха стало возможным из-за метода отбора проб.

В дополнение к анализу на газовом хроматографе, наличие признаков реакции определялось изменением давления и визуальными наблюдениями

за изменением цвета и консистенции поверхностей NaK образцов. Если образец имеет желтую окраску, то это может указывать на образование супероксида калия, если черную — образование углерода.

Выводы

Были выполнены два эксперимента с NaK и диоксидом углерода при 60 и 90 °С, и окись углерода не была обнаружена, за исключением одного из сосудов с NaK реакторного качества при 90 °С, уровень которой оказался чрезвычайно низким. Кроме того, визуально не было замечено никакого свидетельства образования супероксида калия, который был бы определен по ярко-желтой окраске (рис. 16).

Давление в сосудах, содержащих 100 %-ю двуокись углерода снизилось незначительно, но больше, чем в заполненных азотом. Изменение веса и внешний вид указывают, что реакция практически не проходила.

Разумно сделать вывод, что практические испытания и теоретические исследования показали, что для предлагаемой температуры процесса карбонизации (близкой к комнатной), появление супероксидов калия маловероятно, что, следовательно, означает маловероятное появление карбонила калия.

После завершения этих испытаний можно быть достаточно уверенным в том, что, даже по самым пессимистичным прогнозам, процесс карбонизации NaK не будет производить любые потенциально взрывоопасные соединения. Поэтому было решено провести следующий этап испытаний, чтобы установить подходящие параметры процесса карбонизации, что подробно описано в следующих разделах.



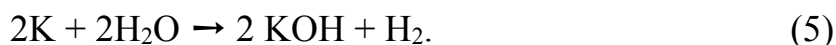
Рис. 16. Внешний вид образцов в течение пятинедельных испытаний при 90 °С на быстром реакторе Doungeay

Испытания процесса карбонизации NaK

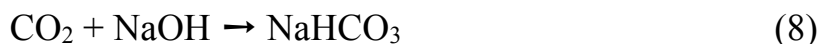
Эти испытания проводились в перчаточном боксе, используемом в предыдущей кампании, позволяющем одновременно проводить испытания путем воздействия газа (смеси влажного диоксида углерода и азота). Кроме того, в перчаточный бокс были встроены входной и выходной каналы, предназначенные для подачи газа. Подробная информация представлена ниже.

Химия процесса карбонизации NaK

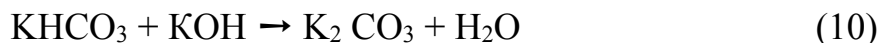
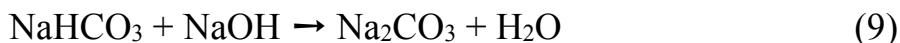
Реакции взаимодействия натрия и калия с влажным диоксидом углерода описаны в уравнениях (5) и (6):



Начальная реакции с водяным паром образует гидроксид, который быстро превращается в бикарбонат в присутствии избыточного углекислого газа, как показано в уравнениях (7) и (8):



В зависимости от температуры реакции также может образовываться карбонат, как показано в уравнениях (9) и (10):



Эти процессы показаны на рисунке 17.

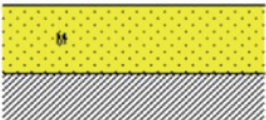
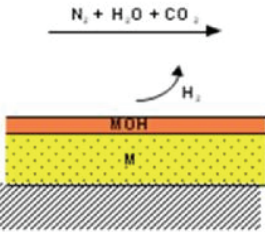
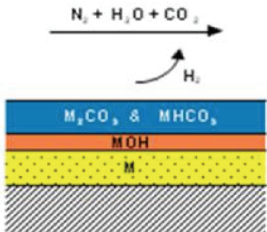
Начальное состояние	Образование гидроксида	Образование карбонатов	Конечное состояние
			
	$M + H_2O \rightarrow MOH + \frac{1}{2} H_2$	$2MOH + CO_2 \rightarrow M_2CO_3 + H_2O$ $MOH + CO_2 \rightarrow MHCO_3$	

Рис. 17. Изображение процесса карбонизации.
М здесь представляет щелочной металл: натрий или калий

Определение граничных параметров испытаний

Основываясь на предыдущих исследованиях процесса карбонизации натрия, в двух сериях испытаний были определены начальные параметры процесса, которые показаны в таблице 3. В обоих случаях условия процесса были выбраны таким образом, что они будут преимущественно производить сухой бикарбонат для двух сплавов NaK (реакторного и эвтектического).

Таблица 3. Начальные параметры процесса карбонизации для образцов эвтектического и реакторного сплавов NaK на быстром реакторе Doungeay

Параметр	Серия 1 26 NaK образцов (12 эвтектика, 14 реакторный)	Серия 2 20 NaK образцов (9 эвтектика, 11 реакторный)
Газ-носитель	80 % N ₂ , 20 % CO ₂	80 % N ₂ , 20 % CO ₂
Содержание пара, % объем.	2	0,25
Температура, °C	30	30
Время выдержки	2–3 суток	6 недель

Описание испытательного стенда

Испытательный стенд состоит из перчаточного бокса, в котором можно поддерживать постоянный уровень температуры при подаче рабочего газа. Рабочий газ был получен путем смешивания диоксида углерода и азота вместе с добавлением водяного пара из парогенератора, чтобы получить необходимую влажность. В испытательный стенд были заложены образцы щелочного металла различной толщины и геометрии (рис. 18). Испытательный стенд был модифицирован таким образом, что все образцы могли быть точно взвешены, так, чтобы соблюдался необходимый баланс между температурой окружающей среды внизу стенда и основанием нагревательной камеры. Образцы взвешивали регулярно для определения общей скорости реакции, полученной из убыли масс образцов и концентрации водорода в отходящем газе.

Результаты

Первые испытания проводились при 30 °C и 2 %-й влажностью по объёму смеси, состоящей из 80 % азота и 20 % двуокиси углерода. Эти параметры считались подходящими для нейтрализации NaK внутри корпуса DFR и трубопроводов. Концентрация пара была выбрана таким образом, чтобы точка росы была достаточно низкой, чтобы снизить вероятность

появления конденсата в холодных точках системы, но достаточно высокой, чтобы минимизировать время обработки.

Несколько образцов реакторного и эвтектического сплавов различной толщины и геометрии подвергались воздействию в указанных выше условиях. Это были несложные опыты, которые представляли собой наблюдения за поведением реакции, потому что не было никакого предыдущего опыта карбонизации NaK.

Результаты оказались неожиданными. Они показали, что на поверхности NaK образуется дендритический продукт. Продукт представлял собой выделившийся и окислившийся NaK, который немедленно превращался в сухой продукт (рис. 19). Это произошло как в случаях с эвтектическим, так и с реакторным сплавами.



Рис. 18. Образцы NaK при испытаниях процесса карбонизации на быстром реакторе Dounreay



Рис. 19. Образцы продуктов реакции эвтектического и реакторного сплавов NaK

Признаком окончания реакции являлось «сухое распухание», которое наблюдалось для образца эвтектического сплава NaK (рис. 20) и которое в конечном счете привело к остановке развития процесса.



Рис. 20. Образец процесса окисления NaK

Эти опыты были частью испытаний NaK, которые были разработаны для исследования реакции смоченных NaK поверхностей при различных условиях обработки. Была зафиксирована минимальная концентрация паров, которая зависела от стартовой температуры процесса. Сделано предположение, что выделение пара происходит при формировании водного раствора гидроксида. При отсутствии диоксида углерода в газе-носителе, была обнаружена концентрация паров схожая с той, которая образуется при формировании жидкого гидроксида. Как только формируется гидроксид, подается диоксид углерода, который быстро способствует образованию карбоната или бикарбоната.

Этот тест был проведен для повторения условий процесса карбонизации. Было выдвинуто предположение, что «сухое распухание» связана с наличием калия, поскольку он не был замечен в процессе карбонизации натрия. Другой мнение заключалось в том, что жидкий NaK в течение испытательного периода подвергался экструзии, чтобы сформировать тонкие дендритические наросты малой массы. Было сделано предположение, что если образуются наросты, то обнаженный NaK будет реагировать, вызывая локальное повышение температуры. Если это локальная температура превышает 100 °C, то можно будет наблюдать процесс разложения бикарбоната в карбонат. Это может привести к образованию воды и двуокиси углерода, которые могли бы способствовать дальнейшей реакции с NaK. Этот процесс представляет собой механизм положительной обратной связи. Как только есть достаточное количество бикарбоната, температура может быть поднята достаточно высоко для самопроизвольной реакции между NaK и углекислым газом. Так как атмосфера уже содержит 20 % диоксида углерода, то это достаточная концентрация для эффективного «сжигания» NaK в диоксиде углерода. Испытаниям подвергались 12 образцов: 3 — чистого натрия, 3 — чистого калия, 3 — эвтектического сплава NaK и 3 — реакторного сплава NaK. На образцах натрия и калия сформировалась корка, на которой не выявлено никаких дендритических наростов. Корка, состоящая преимущественно

из бикарбоната, оказалась довольно объемной. Образцы реакторного сплава обросли массивными дендритическими наростами, состоящих из большого количества порошкообразного бикарбоната, который не показал никаких признаков нестабильности. Однако все три образца эвтектического сплава NaK прореагировали нестабильно в разное время испытаний, а один образец дважды. Эти события были зафиксированы камерами видеонаблюдения, что показало возможность возгорания образцов (рис. 21).



Рис. 21. Возгорание образца NaK при испытаниях на быстром реакторе Dounreay

Выводы

Была проведена серия испытаний для поиска подходящих режимов для безопасного и эффективного применения процесса карбонизации для химической очистки остатков NaK первого контура DFR. Эта работа привела к следующим выводам:

- для карбонизации при температуре до 90 °C не образуется взрывоопасных соединений супероксида калия или карбонильного калия даже при самых неблагоприятных условиях обработки (например, недостаток влажности);
- процесс карбонизации в применении к жидкому NaK отображает гораздо более сложное поведение, чем эквивалентные обработки твердых щелочных металлов (например, натрия). Это впервые было систематически исследовано и опубликовано;
- взаимодействие образцов обусловлено появлением сложных дендритических структур и четко отделенных слоев карбоната или бикарбоната, из которых состоит «сухой продукт» на поверхности непрореагировавшего твердого слоя щелочного металла;

– наблюдалось непредсказуемое поведение реакции, как следствие присутствия в продукте реакции бикарбоната, который разлагается при достаточно низких температурах, высвобождая воду. Повышение температур этой реакции может вызвать реакцию между NaK и CO₂. По указанным выше причинам, это не рекомендуется делать.

8. Исследовательский быстрый реактор БР-10

Исследовательский быстрый реактор БР-10 (рис. 22) расположен в ГНЦ РФ – ФЭИ, Обнинск, Россия. За время эксплуатации реактора БР-10 в период с 1959 по 2002 гг. накоплено значительное количество (в масштабах ГНЦ РФ – ФЭИ) радиоактивных отходов жидко-металлических теплоносителей.

В процессе трехкратной замены натриевого теплоносителя первого контура, при регенерации холодных ловушек, натрий сливался в баки длительного хранения (БДХ). В баки также заливали теплоноситель второго контура (эвтектический сплав Na-K), загрязненный ртутью в результате разгерметизации трубки парогенератора двухстеночной конструкции с ртутной прослойкой, эксплуатировавшегося в составе реактора БР-2, в здании которого был сооружен реактор БР-5 (впоследствии БР-10).

К моменту окончательного останова реактора в БДХ-1 находилось 4,5 м³ РАО (Na 44 %, K 48,5 %, Hg 7,5 %; удельная радиоактивность по Cs-137 $7 \cdot 10^8$ Бк/кг, по тритию $2 \cdot 10^8$ Бк/кг). В БДХ-2 — 4,5 м³ (Na 95 %, K 5 %, Hg 0,02 % удельная радиоактивность $3 \cdot 10^8$ Бк/кг по Cs-137, по тритию $2 \cdot 10^8$ Бк/кг). В отдельном баке первого контура размещены 2 м³ РАО натрия (Cs-137 до 10^8 Бк/кг, Cs-134 до 10^6 Бк/кг, по тритию до 10^8 Бк/кг). Схема расположения сливных баков представлена на рис. 23.

Кроме того, на реакторе было накоплено 16 отработавших холодных ловушек окислов (ХЛО), вырезанных из первого контура в процессе его

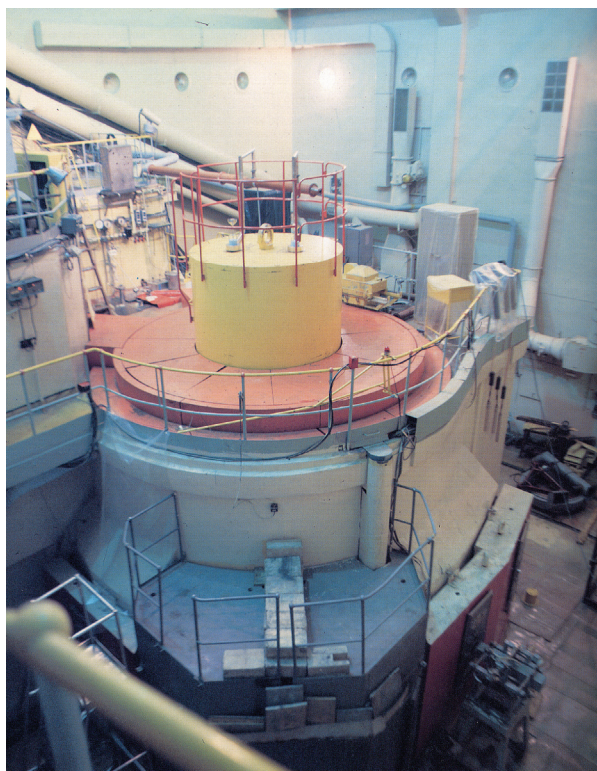


Рис. 22. Внешний вид реакторного зала реактора БР-10

эксплуатации; накопленная активность по Cs-137 40–100 Кюри. Общий объем радиоактивного Na в этих ХЛО около 3 м³.

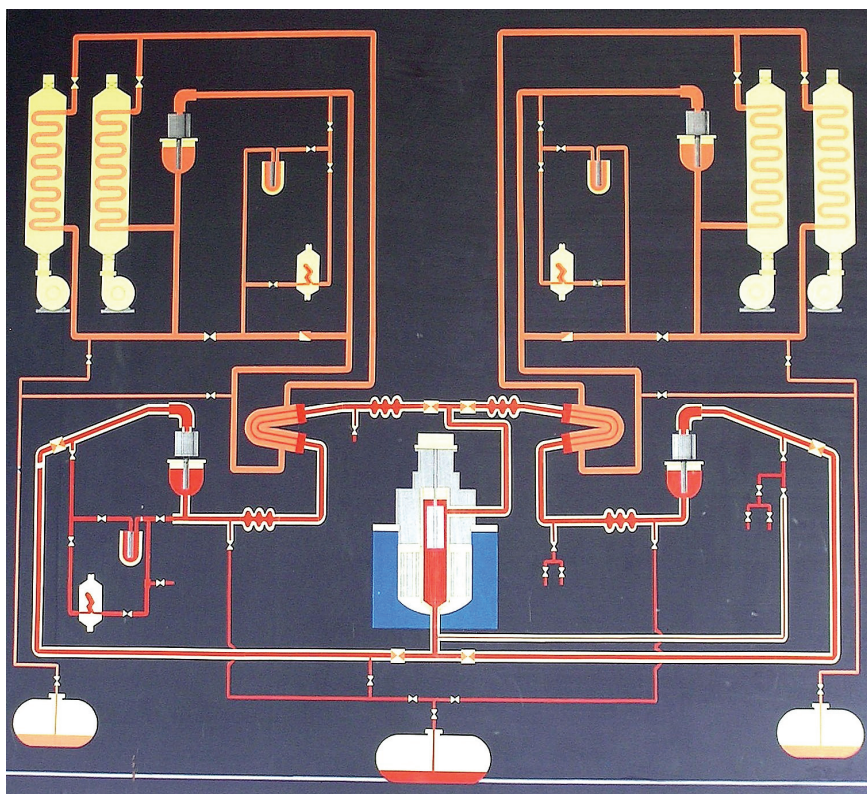


Рис. 23. Технологическая схема реактора БР-10

Подлежало переработке также около 4 м³ натрия, слитого в баки из второго контура, который классифицируется как РАО ($2 \cdot 10^9$ Бк/кг по тритию). Во второй петле этого контура оставалось ХЛО-2 с 200 л натрия, загрязненного тритием.

Общее количество РАО щелочных теплоносителей, находящихся на временном хранении в БР-10, составляло около 18 м³ общей активностью более 1000 Кюри. Точный объем радиоактивного теплоносителя указать невозможно, так как неизвестное количество натрия оставалось в недемонтированном оборудовании первого и второго контуров — трубопроводах, баках, теплообменниках, волнистых компенсаторах. Этот натрий относится к недренируемым (несливаемым) остаткам теплоносителя и требует специальной технологии нейтрализации перед демонтажем оборудования.

Решением Коллегии Минатома РФ (приказ от 05.03.1997 № 130) было установлено создать на базе ИР БР-10 в ГНЦ РФ — ФЭИ экспериментальный полигон по отработке технологий вывода из эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах. В соответствии с приказом по Минатому от 30.03.1999 № 204, ИР БР-10 был окончательно остановлен в декабре 2002 года.

Метод твердофазного окисления

Был проведен анализ различных способов переработки щелочных металлов, из которых по соображениям технологичности и безопасности процессов был выбран для дальнейших исследований метод ТФО — твердофазное окисление щелочного металла гранулированным (аморфным по структуре) отвальным шлаком медеплавильного производства. ТФО основан на самопроизвольной экзотермической химической реакции щелочного металла сначала с оксидами железа, а затем с оксидами кремния и алюминия, являющимися основными компонентами шлака (исходное объемное соотношение металла к шлаку — 1 : 2,5).

Метод ТФО был успешно продемонстрирован 16 раз на лабораторной установке Минерал-3 с разовой переработкой 3–5 л щелочного металла (Na, Na-K, Na-K-Hg, радиоактивный Na) в минеральный продукт. Установлено, что в продукте отсутствует непрореагировавший щелочной металл. В процессе ТФО не происходит выхода изотопа Cs-137 за пределы продукта, в котором также может быть задержано 40–50 % примеси ртути. Выделение водорода в защитный газ незначительно, то есть решена проблема взрывоопасности. В конце экспериментальной серии было успешно переработано 10 литров щелочного металла по усовершенствованной методике ТФО. Технология ТФО щелочных металлов запатентована в России (патент РФ на изобретение №2200991, 2003 г. Патентообладатель ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», авторы — Смыков В. Б. и др.).

После успешных экспериментов на лабораторной установке Минерал-3 (рис. 24) был создан стенд Минерал-30, на котором было проведено 7 крупномасштабных экспериментов по разовой переработке до 30 литров щелочного металла (Na, Na-K). Впоследствии была сконструирована установка Минерал-50 для разовой переработки 50 литров щелочного металла. На установке Минерал-50 успешно проведено четыре крупномасштабных эксперимента по переработке до 40–50 литров натрия и сплава Na-K.

В отличие от водных технологий, нейтрализация щелочного металла в ТФО



Рис. 24. Экспериментальная установка Минерал-3

проходит в одну стадию. Продуктом переработки РАО щелочного металла является твердый, минералоподобный спёк продуктов реакции (рис. 25), заключенный в стальную реакционную емкость, которая затем погружается в контейнер НЗК-1,5 и направляется на сухое хранение в хранилище твердых РАО. Данный спёк является устойчивой матрицей, содержащей в себе все радионуклиды (кроме трития) из щелочных ЖТМ и все щелочные элементы в виде химически устойчивых соединений. Данная матрица является первым барьером, предотвращающим поступление радионуклидов в окружающую среду. Вторым барьером является стальная оболочка реакционной емкости.



Рис. 25. Продукт переработки 30 литров NaK на установке Минерал-30 (стальной реакционный контейнер удален)

Материалом реакционной ёмкости должна быть углеродистая сталь. Нержавеющая сталь X18H10T оказалась неработоспособна — подвержена трещинообразованию. Таким образом, не требуется расходовать дорогие и дефицитные конструкционные материалы. Относительно высокая температура (1100 – 1350 °C) (рис. 26), развивающаяся в ходе процесса ТФО, обеспечивает полное расходование щелочного металла на реакцию со шлаком.

Конечный объем продукта переработки, направляемый на сухое хранение в хранилище ТРО, превышает исходный объем РАО не более чем в 2,5–3,0 раза. Общая активность продукта будет равна активности внедренных РАО щелочного металла, а удельная активность будет, соответственно, в 5–6 раз ниже, так как масса конечного продукта больше массы переработанного щелочного металла в 5–6 раз.

Процесс ТФО не приводит к образованию газов, требующих применения специальных мер безопасности. Рост давления защитного газа незначительный и обусловлен его разогревом.

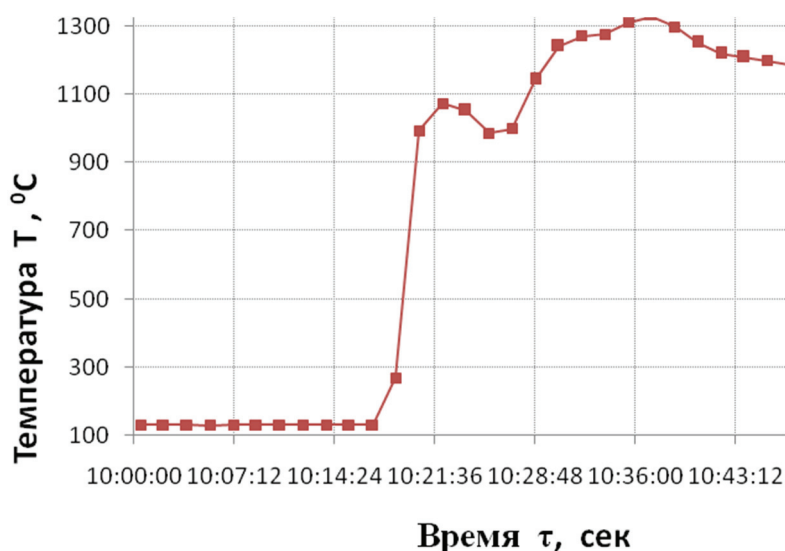


Рис. 26. Типичная зависимость температуры от времени проведения процесса твердофазного окисления

За все время переработки 18 м^3 щелочных теплоносителей реактора БР-10 объём технологических газовых выбросов (аргона или азота, используемых для продувки установки), составит $200 — 300 \text{ м}^3$, но этот вопрос не принципиальный. Не образуются конечные и промежуточные формы жидких РАО, требующие дополнительной переработки, в отличие от водных технологий.

Для перемешивания реагентов (металлургического шлака и щелочного металла) не используются механические устройства: данный процесс проходит самопроизвольно в реакционной ёмкости под действием сил тяжести (удельная плотность гранулированного шлака составляет $3,3–3,5 \text{ г/см}^3$, а жидкого щелочного металла $0,8–0,9 \text{ г/см}^3$) после достижения определенной температуры исходных веществ ($200–250 \text{ }^\circ\text{C}$). Это повышает надежность установки. После остывания конечный продукт переработки имеет удельную плотность уже $4,0–4,5 \text{ г/см}^3$ за счет образования более плотной кристаллической структуры.

В настоящее время в здании реактора эксплуатируется опытно-промышленная установки МАГМА-ТФО (аналог стенда МИНЕРАЛ-50), предназначенная для переработки накопленных РАО щелочных металлов (сплав Na-K-Hg) порционно по $35–40$ литров. Переработан натрий 1-го и 2-го контуров, а также натрий, слитый из отработанных ХЛО. Переработан сплав Na-K-Hg из БДХ-2, идёт переработка сплава Na-K-Hg из БДХ-1.

Разработана, изготовлена и успешно испытана на натрии установка МИНЕРАЛ-100/150 (масштабированный аналог стенда МИНЕРАЛ-30) для переработки уже $100–150$ литров щелочного металла за одну загрузку. При реа-

лизации концепции «экспериментального полигона для отработки технологий вывода из эксплуатации реакторов типа БН» на базе реактора БР-10 целесообразно начать разработку опытной установки МИНЕРАЛ-КУБ для кондиционирования методом ТФО до 1000 литров натрия за одну загрузку, что существенно ускорит время переработки отработанного щелочного металла на выводимых из эксплуатации опытных и промышленных реакторов БН и сократит период вывода их из эксплуатации.

Нейтрализация недренируемых остатков

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработан метод нейтрализации недренируемых остатков щелочных жидкометаллических теплоносителей (Na, сплав Na-K) газообразной закисью азота (оксид диазота, N_2O), характеризующийся отсутствием образования водорода, что повышает безопасность технологии. Вместо водорода продуктом реакции является газообразный азот, по концентрации которого в газе-носителе происходит контроль процесса нейтрализации.

В ходе исследований метода был экспериментально установлен механизм взаимодействия Na, Cs и эвтектического сплава Na-K с газообразной N_2O . Показано, что промежуточным соединением, обеспечивающим полное расходование щелочного металла (Me) на реакцию, является гипонитрит щелочного металла $Me_2N_2O_2$. Определены начальные условия взаимодействия и температурные эффекты, состав конечного продукта (смесь оксида, нитрата и нитрита щелочного металла в различных соотношениях) в зависимости от продолжительности процесса нейтрализации, установлена кинетика поглощения N_2O щелочным металлом, исследован состав газовой фазы и т.д.

Проведены испытания метода на примерах нейтрализации остатков сплава Na-K в транспортной ёмкости и в горячей ловушке окислов (ГЛО), отработавшей ресурс в составе наземного стенда-прототипа космической ЯЭУ. Результаты испытаний были положительными: весь сплав, оставшийся в емкости (около 1,5 литра) и в ГЛО (около 2,0 литров) был полностью нейтрализован и переведен в солевые и оксидные соединения — $NaNO_2$, KNO_2 , $NaNO_3$, KNO_3 , Na_2O , K_2O_2 . Затем эти соединения были безопасно растворены в воде также без образования H_2 , солевые растворы слиты и утилизированы. Таким образом, оборудование переведено в безопасное состояние.

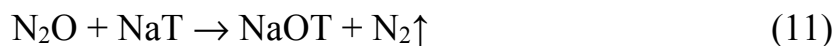
Для отработки новой технологии нейтрализации недренируемых остатков натрия и примесей в ХЛО второго контура ИР БР-10 газообразной закисью азота, разработан, изготовлен и пущен в опытную эксплуатацию стенд «Луиза-Т» (рис. 27). На нем проведена экспериментальная отработка технологии нейтрализации остатков натрия в штатной ХЛО второй петли второго контура реактора ХЛО-2. Количество натрия с примесями, не

дренированного из ХЛО-2, заранее точно не было известно. Радиоактивность остатков натрия в ХЛО определялась содержанием трития, удельная активность которого была $4,0 \cdot 10^6$ Бк/кг.

Процесс нейтрализации остатков натрия в фильтрующей набивке и в отстойнике проходил в спокойном температурном режиме (максимальный уровень температур не превышал 340–350 °С) без скачков давления газовой фазы.

На нейтрализацию недренированного Na с окислами было затрачено около 33 кг (около 16,8 м³) газообразной закиси азота. По этому количеству определено, что в ХЛО-2 изначально было около 17 кг металлического натрия с примесями. В результате нейтрализации весь натрий был переведен преимущественно в солевые формы (нитрат, нитрит, гипонитрит натрия), содержание которых в конечном продукте составляло 75–80 % масс.

Установлено, что около 99,9 % радиоактивности трития, содержащейся в недренируемом остатке в виде тритида натрия (NaT), в результате взаимодействия с закисью азота было зафиксировано в виде тритированной гидроокиси натрия (NaOT) согласно реакции:



На ИР БР-10 проведена опытно-экспериментальная процедура нейтрализации остатков натрия в 1-й петле 2-го контура с помощью закиси азота (рис. 28).

Заранее (в 2003 году) из этой петли было слито 1800 литров натрия в сливной бак второго контура (объём первой петли второго контура составляет 2000 литров). Перед обработкой закисью азота петля была вновь разогрета и из неё было слито ещё около 4 литров натрия, а затем ещё около 0,3 литров натрия через дренажную систему.

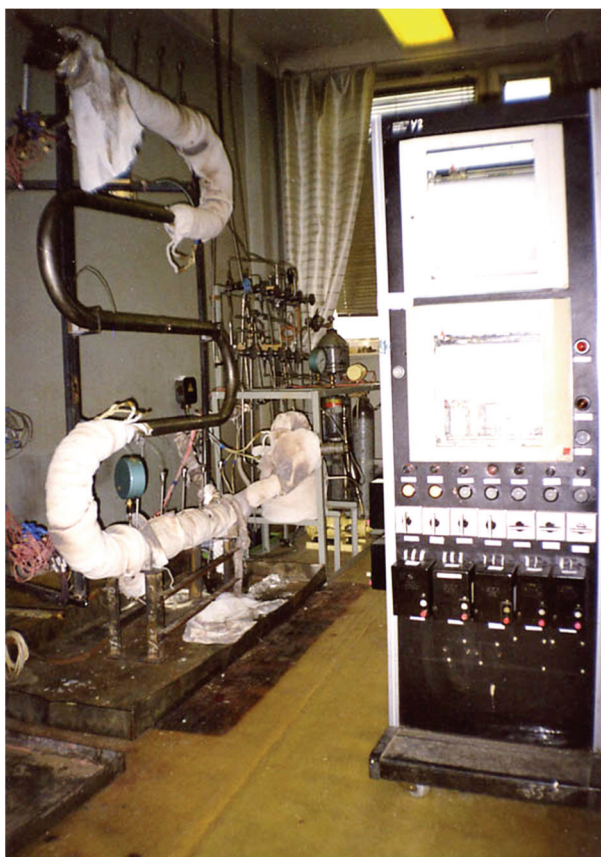


Рис. 27. Стенд «Луиза-Т»

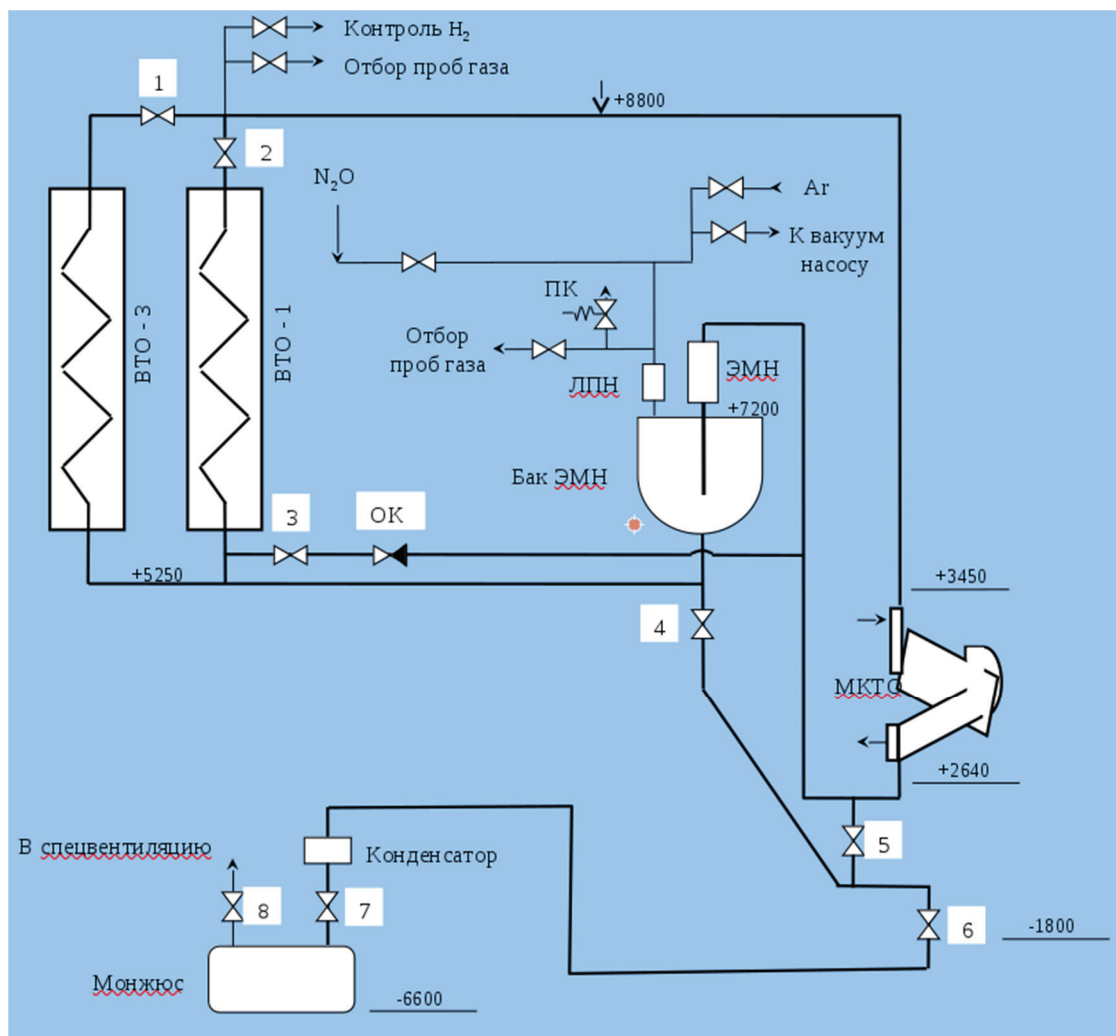


Рис. 28. Схема обработки первой петли второго контура БР-10

Предварительные оценки, сделанные на основе имеющихся эксплуатационных данных, показывают, что на внутренних поверхностях оборудования и трубопроводов первой петли второго контура (площадь внутренней поверхности около 300 м^2) содержится приблизительно 30 литров натрия. Радиоактивность натрия 2-го контура по тритию составляла величину $5 \cdot 10^4$ Бк/л. Других радиоактивных примесей в натрии не обнаружено.

Подготовка оборудования и трубопроводов первой петли второго контура к проведению исследований по нейтрализации остатков натрия и его окислов включала следующие операции:

- вакуумную отгонку натрия в контур из тупиковых участков сильфонов вентилях. Вакуумная отгонка проводилась при разрежении 10^{-1} мм рт. ст. и температуре $390\text{--}420 \text{ }^\circ\text{C}$;
- монтаж трубопроводов подачи закиси азота от рабочего участка «ЛУИЗА–Т» до существующих трубопроводов подачи газа в бак насоса;

– проверку наличия газовой проходимости по дренажным трубопроводам в горячем и в холодном состоянии.

Объем первой петли второго контура (~2000 литров) перед подачей порций закиси азота был заполнен аргоном до 0,05 кгс/см² (изб.). Подача всех порций закиси азота осуществлялась в бак насоса ЭМН, имеющий объем 600 литров. Для доставки закиси азота во внутренние поверхности первой петли была использована особенность компоновки оборудования первой петли второго контура, позволяющая организовать естественную циркуляцию газа внутри первой петли.

Естественная циркуляция газа в первой петле второго контура была организована за счет создания перепада температур газа внутри петли путем включения электрообогрева определенной части оборудования и трубопроводов (дренажная линия, межконтурный теплообменник (МКТО), трубопровод от МКТО к воздушному теплообменнику (ВТО), обеспечивающих естественную циркуляцию газа при отсутствии обогрева ВТО. Обратное направление естественной циркуляции газа обеспечивалось электрообогревом ВТО при отсутствии обогрева МКТО. После сброса избыточного давления газа (Ar) до 0,0 ати в контур порционно (по ~100 литров) вводилась закись азота. Контроль за составом газовой смеси осуществлялся периодическим отбором проб газа с последующим хроматографическим анализом.

На первом этапе проводилась обработка разогретых до 260 ± 10 °С межконтурного теплообменника (МКТО); трубопровода от выхода из МКТО до верхней отметки основного трубопровода на входе в ВТО; части напорного трубопровода от места врезки трубопровода байпаса до входа в МКТО; трубопровода от выхода из ВТО до тройника подключения дренажного трубопровода; трубопроводов дренажного участка. Порции закиси азота, по 100 литров каждая, последовательно подавались в холодный бак насоса ЭМН, откуда за счет естественной циркуляции закись азота разносилась по первой петле второго контура. Газовая смесь имела в своем составе не более 6,0 % (об.) закиси азота. Поэтому наблюдаемые изменения температуры были очень плавными и незначительными по абсолютной величине. Закись азота срабатывалась полностью, в петле накапливался азот.

На втором этапе электрообогрев МКТО был отключен и начат разогрев воздушных теплообменников ВТО, продолжена обработка бака насоса, электромагнитного насоса ЭМН, ЛПН бака ЭМН, напорного трубопровода от выхода из ЭМН до МКТО. Последовательно обрабатывались дренажные трубопроводы, трубопровод байпаса, ВТО с входными и выходными трубопроводами.

На третьем этапе, после завершения окисления натрия закисью азота, проводилось термическое разложение гипонитрита натрия, который, как показывает опыт применения N_2O , образуется в заметном количестве. Для этого предварительно контур вакуумировался и заполнялся защитным газом (Ar). Температура обрабатываемых участков контура повышалась до $\sim 320^\circ\text{C}$ и выдерживалась в течение нескольких часов. В пробах газа, отбираемых из бака ЭМН, увеличивалось содержание азота (при этом давление газа в контуре несколько возрастало), что свидетельствовало о термическом разложении гипонитрита натрия. После стабилизации концентрации азота проводилась полная замена газа в контуре (сброс давления, вакуумирование, заполнение аргоном).

На заключительном этапе обработки контура закисью азота (её концентрация в контуре была доведена до 48 %) было отмечено, что снижения концентрации закиси азота не происходит даже при выдержке более 24 часов. Процесс обработки был прекращен.

После завершения нейтрализации натрия закисью азота была проведена паровая обработка внутренних поверхностей первой петли при температуре пара $100\text{--}110^\circ\text{C}$ в течение 20 минут. Выделения водорода газохроматографическим анализом проб газа не было обнаружено. Однако при последующей обработке водой дренажного узла (вливо 5,6 литров воды) в газовом объёме контура (заполнен защитным газом Ar) содержание H_2 возросло до 3,0 % (об.), что свидетельствует о том, что в линиях дренажа было накоплено порядка 110 граммов натрия, который не был нейтрализован закисью азота. При обследовании дренажного узла в одной из тонких байпасных трубок (DN 10) на её горизонтальном участке была обнаружена «пробка» из окислов натрия. Растворить водой её не удалось, поэтому данный участок был вырезан.

Проведённая на ИР БР-10 опытно-экспериментальная процедура обработки недренируемых остатков натрия в трубопроводах и оборудовании второго контура (первая петля) закисью азота в целом дала положительные результаты.

Всего в первую петлю второго контура было подано 15300 литров закиси азота. Обработка первой петли закисью азота заняла около 200 часов чистого времени. Из первой петли второго контура сброшено 1520 литров непрореагировавшей закиси азота. С натрием прореагировало 13800 литров закиси азота, то есть около 90 %. Судя по количеству поглощённой закиси азота, общая нейтрализованная масса недренированного натрия в первой петле второго контура составляла около 28 килограммов.

Радиометрический и химический анализ пробы продукта взаимодействия N_2O с натрием, отобранной из обработанного контура, дал следующие результаты по содержанию:

- трития в продукте $4,4 \cdot 10^6$ Бк/кг;
- Na_2O 70 % (масс.);
- $NaNO_2$ 12,4 % (масс.);
- $NaNO_3$ 10,0 % (масс.);
- $Na_2N_2O_2$ не обнаружено;
- металлический Na не обнаружен;
- продуктов коррозии нержавеющей стали 5–6 % (масс.).

Полученный опыт проведения нейтрализации недренированных остатков натрия в оборудовании и трубопроводах первой петли второго контура ИР БР-10 свидетельствует о том, что перед проведением данной процедуры требуется более полный слив остатков натрия с последующей высокотемпературной вакуумной отгонкой остатков натрия из застойных участков. Особое внимание следует уделять более полному удалению натрия из трубопроводов дренажных систем.

Применительно к проблеме обезвреживания отработанных ХЛО проведены исследования по разработке технологии кондиционирования продукта нейтрализации натрия закисью азота путем его омоноличивания в корпусе самой отработанной ХЛО. Показано, что наиболее перспективным и технологичным способом омоноличивания является инкорпорация в геоцементный компаунд. ХЛО, стенки которой выполняют роль упаковки отвержденных РАО, может направляться на длительное хранение или захоронение. Данный метод испытан на двух ХЛО второго контура реактора БР-10, к настоящему времени обезврежены также все 16 отработанных ХЛО 1-го контура. Достоинством данной технологии является отсутствие образования жидких РАО, требующих слива из ХЛО и дополнительной переработки на установке цементирования с последующей упаковки в защитных контейнерах для длительного хранения или захоронения в ПЗРО.

Несколько лет назад технология газофазного окисления недренируемых остатков натрия применительно к ХЛО 1-го контура и отдельного оборудования была усовершенствована и используется на установке ЛУИЗА-РАО. Газом-носителем остался аргон, а к N_2O был добавлен углекислый газ CO_2 , что обеспечило дополнительную безопасность процесса, а в качестве конечного продукта получилась уже не смесь оксида, нитратов и нитритов натрия, а преимущественно карбонат натрия Na_2CO_3 . Данная технология запатентована (Патент РФ на изобретение № 2794139, 2021 год. Патентообладатель — АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», авторы Смыков В. Б., Пронин А. А., Легких К. Г.).

9. Применение инфракрасных технологий

Долгосрочная экономия затрат, повышение безопасности и увеличение понимания процесса управления — одни из самых удивительных результатов использования новейших технологий с инфракрасной камерой. Все больше и больше отраслей применяют инфракрасные камеры, так как увеличение их возможностей сопровождается снижением стоимости.

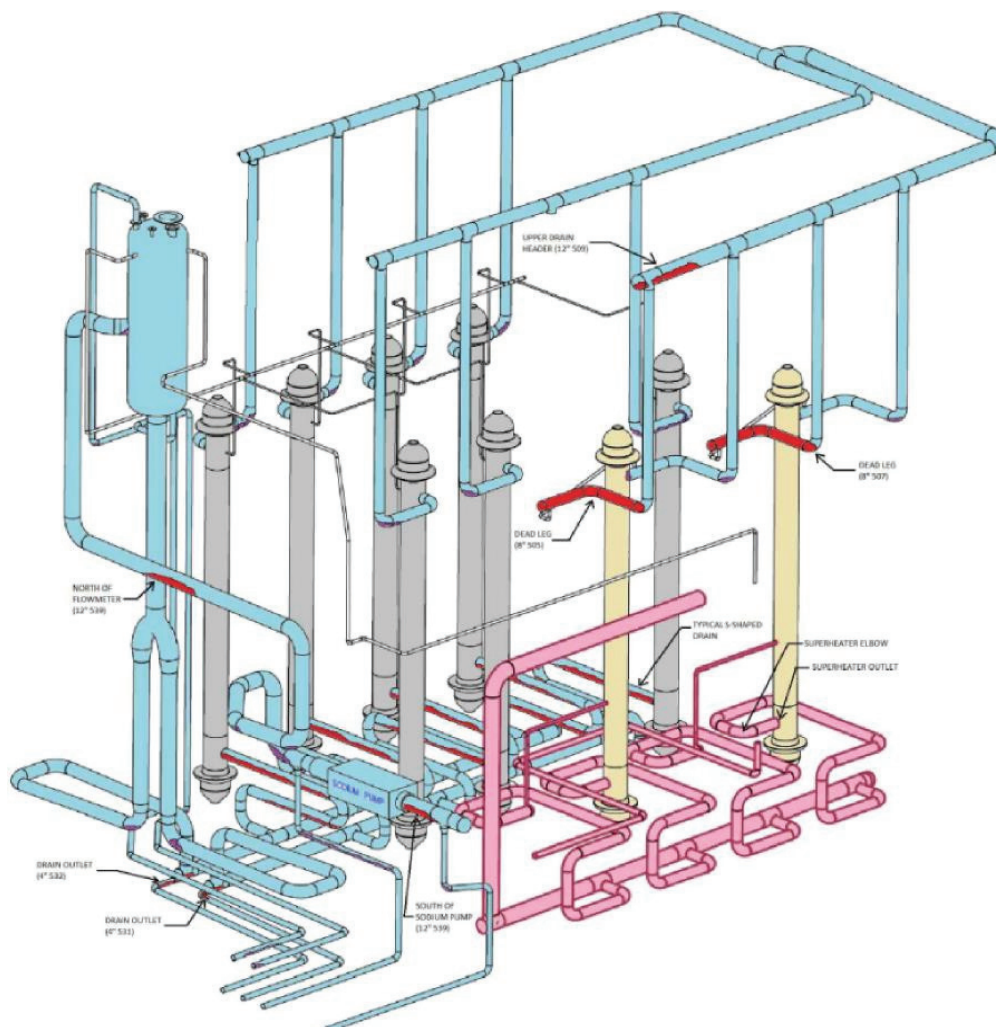
Проекты вывода из эксплуатации реакторов с применением инфракрасных камер — не исключения. Инженеры центра INL с помощью этих камер обеспечили мониторинг безопасного удаления остаточного натрия из контуров и корпуса реактора EBR-II. Схема на рис. 29 показывает количества натрия и бикарбоната натрия во втором контуре, обнаруженные инфракрасной техникой.

Инфракрасные камеры обеспечивают изображение инфракрасного излучения (т. е. тепловой энергии), которое невидимо невооруженным глазом. В отличие от видимого света, инфракрасный свет имеет длину волны больше, чем ту, которую может распознать человеческий глаз. Инфракрасный свет испускается всеми предметами, имеющими температуру выше абсолютного нуля (-273°C). Чем выше температура, тем больше инфракрасного (теплого) излучения. Даже холодные предметы (например, лёд) испускают тепловое излучение и могут быть отображены на инфракрасных камерах.

Инфракрасные камеры применяются примерно с конца 1960-х. С течением времени они стали меньше, более высокого качества и дешевле. Первоначально в инфракрасных камерах применялось охлаждение жидким азотом, а изображения были не двумерными. Размеры камер были настолько большими, что их приходилось устанавливать в задней части небольшого грузовика. В противоположность этому, небольшие инфракрасные камеры используются сегодня без активного охлаждения и с аккумуляторным питанием. Они обеспечивают сложные бортовые обработки изображений с разрешением $> 640 \times 480$ пикселей и стоят \$ 8000 USD.

Наиболее распространенными являются инфракрасные камеры, в которых используют линзы для фокусировки инфракрасного излучения на фокусной плоскости. Это двухмерный кристаллический массив, который чувствителен в инфракрасном диапазоне.

Электронный сигнал от фокусной плоскости обрабатывается электронной начинкой камеры, которая выдает тепловое изображение на видеомонитор. Как правило, изображения более светлых тонов отображают более высокие температуры (рис. 30). Более дорогие камеры могут выполнять точные расчеты температуры, если поверхностные характеристики рассматриваемого объекта известны.



	Тонкий слой бикарбоната
	Слой бикарбоната менее 1 дюйма толщиной
	Слой бикарбоната более 1 дюйма толщиной (потенциальные отложения натрия)
	Испаритель (недоступен)
	Пароперегреватель (не доступен)
	Поврежденный трубопровод (не показано, должен быть удален)
	Трубопровод малого диаметра (не показано, должен быть удален)

Рис. 29. Пример определения состояния трубопроводов реактора EBR-II с применением инфракрасных камер

Поскольку тепловая энергия ведет себя иначе, чем видимый свет, требуется применения термографа для правильной интерпретации двухмерных тепловых изображений. Многие зависят от разрешения и ограничений конкретных инфракрасных камер.

Термографисты часто используют инфракрасные камеры для обнаружения неполадок оборудования при проведении профилактических осмотров. При оценке системы электропитания термографист с использованием инфракрасной камеры может определить, является ли оборудование под

угрозой неполадок из-за чрезмерного нагрева, вызванного неплотным соединением или несбалансированной нагрузкой. При освидетельствовании вращающихся механизмов, сравнение тепловых изображений, сделанных в разное время может предсказать неполадки до их возникновения. Например, изображения, показывающие значительное увеличение тепла, часто признак того, что возможна поломка подшипников или уплотнения. Безопасность уже давно является одним из основных преимуществ использования инфракрасных камер для проверки оборудования последние 40 лет, поскольку освидетельствование обычно можно проводить на безопасном расстоянии, а также при пуске и эксплуатации оборудования. Так как инфракрасные камеры становятся все более технологичными и менее дорогими, сфера их применения постоянно расширяется (например, вывод из эксплуатации ядерных реакторов). Рисунок 31 наглядно показывает разницу между тепловым и обычным изображениями наполнения ёмкости натрием.

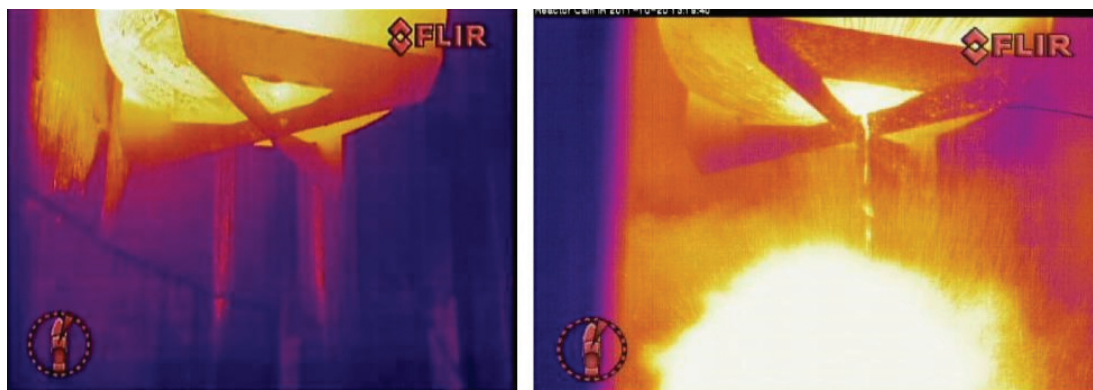


Рис. 31. Изображение горячих натриевых областей внутри реактора EBR-II, полученное при использовании камеры FLIR M-626L

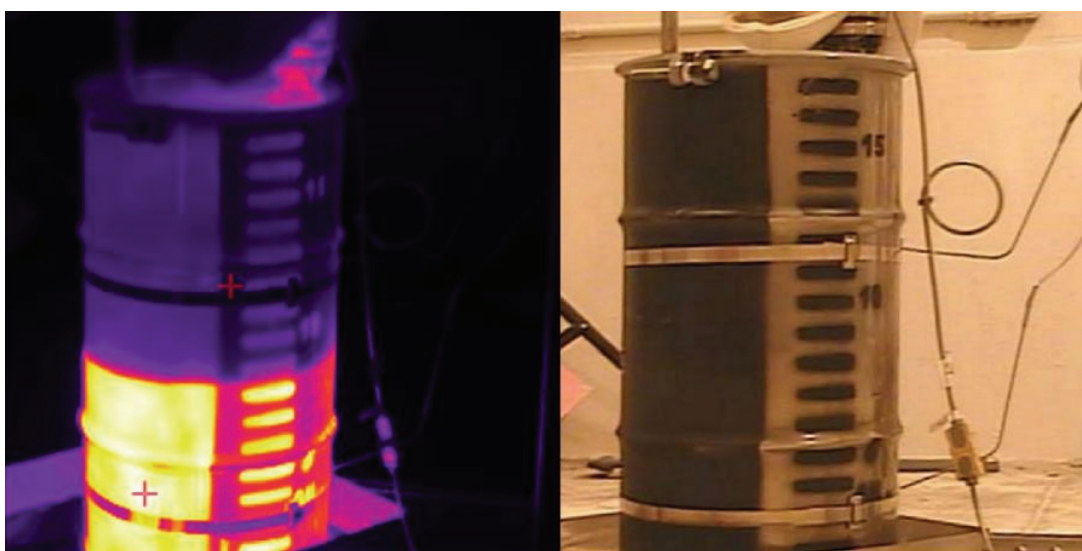


Рис. 32. Инфракрасное и реальное изображения емкости с горячим натрием

Заключение

Обращение с радиоактивными отходами отработанного щелочного теплоносителя быстрых реакторов — комплексная научно-техническая, инженерная и управленческая задача, требующая многоэтапного подхода и постоянного совершенствования технологий, требующая долгосрочного планирования, значительных инвестиций. Несмотря на сложность, современные технологии рассматриваются как надежное решение для безопасной изоляции отходов на необходимые периоды времени. Постоянное совершенствование методов и поиск новых решений остаются актуальными. Безопасность и защита окружающей среды остаются абсолютным приоритетом на всех этапах реализации программ вывода из эксплуатации быстрых реакторов со щелочным жидкометаллическим теплоносителем.

Список используемой литературы

1. 42 USC § 6901 et seq., 1976, “Resource Conservation and Recovery Act (Solid Waste Disposal Act),” *United States Code*, October 21, 1976.
2. Berte, Michel and Bruno Rossin, 2013, “Laser cutting of Superphenix primary vessel internal structures to allow draining of sodium retentions,” Paper 13121, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
3. Choi, J. H., S. D. Suk, D. Cho, J. M. Kim, D. Hahn, J. H. Cahalan, 2006, “Capsule Test for Investigating the Sodium/Carbon Dioxide Interaction,” Paper 6369, Proceedings of ICAPP 2006, Reno, Nevada, USA, June 4–8, 2006.
4. Dooley, Kirk J., David D. Tolman, Jeff D. Jones, and Chad W. Ross, 2013, “Sodium Separation and Treatment of Remote-Handled Transuranic Waste,” Paper 13088, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
5. Farabee, Al, Bill Church, Richard VanLieshout, and Kevin Berry, 2013, “Liquid Metal Hazard Disposition at the Fast Flux Test Facility,” Paper 13087, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
6. Guelin, Emmanuelle, Thomas Calais, and Valerie Grabon, 2013, “Development of a carbonation process for treating components containing oxidized NaK at EDF’s Superphenix plant in Creys-Malville,” Paper 13125, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
7. Jones, Jeffrey D. and Kirk J. Dooley, 2013, “EBR-II Update – September 2012 CWI Completes Treatment of Primary System Sodium,” Paper 13089, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
8. Lerat, Vincent, Joel Godlewski, Jean-Marie Herbet, Pierre-Jean Putod, Jerome Molliex, and Marina LeMeur, 2013, “The Cleaning of Phenix Secondary Loops before Dismantling,” Paper 13095, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
9. Roux, Anne-Marie, Anne Durand, Andrea Faure, Didier Cerat, and Pascal Blin, 2013, “Dismantling of large components from Phenix reactor,” Paper 13111, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
10. Seinturier, Anne-Laure and Thomas Calais, 2013, “Carbonation and flooding of the Superphenix reactor vessel,” Paper 13131, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
11. Sherman, Steven, 2000, “Change of over gas from argon to carbon dioxide,” Hazards Statement F0000-0060-ES-00, Argonne National Laboratory-West, August 2000.

12. Smith, Mike, Brian Fletcher, William Husband, and Tom Gunn, 2013, “Carbonation Development Trials for NaK Residues,” Paper 13140, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
13. Smith, Mike, Brian Fletcher, Fiona Forbes, and Alex Potts, 2013, “Proving Trials for a Novel Process for Cleaning NaK Contaminated DFR Breeder Fuel Elements,” Paper 13141, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
14. Young, Kevin and Kirk J. Dooley, 2013, “Using Infrared Cameras to Support Sodium Remediation and D&D of EBR-II,” Paper 13091, Decommissioning Challenges Conference April 7–11, 2013, Avignon, France, April 2013.
15. Смыков В.Б., Бутов К.А., Кочетков Л.А., Поплавко В.Я., Журин А.В. «Состояние работ по выводу из эксплуатации исследовательских реакторов АМ и БР-10». Доклад 13025, там же.

Подписано к печати 01.08.2025.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,64. Уч.-изд. л. 2,2.
Тираж 20 экз. Заказ № 198.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.