

ПЕРЕРАБОТКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО И ВТОРОГО КОНТУРОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА БН-350

В.Б. Смыков, А.В. Журин, К.Г. Легких, В.В. Алексеев, В.П. Жданов

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033, Калужская область, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Для цитирования: Смыков В.Б., Журин А.В., Легких К.Г., Алексеев В.В., Жданов В.П. Переработка теплоносителя первого и второго контуров при выводе из эксплуатации реактора БН-350. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 164-169. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.16>.

ВВЕДЕНИЕ

На РУ БН-350 проводились мероприятия по обращению с отработавшим щелочным жидкометаллическим теплоносителем (ЩЖМТ) [1]. Наиболее значимыми из них являются

- очистка теплоносителя первого контура от радионуклидов цезия (удельная активность Na первого контура после завершения процесса очистки – $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг);
- изготовление и монтаж оборудования для сверления напорного коллектора реактора и уникального сверления на глубине более 13,4 м в натриевой среде с температурой 280–300°C для выполнения проекта по дренированию теплоносителя;
- дренирование максимально возможного объема теплоносителя из корпуса и петель первого контура (с учетом 100 м^3 Na, имевшегося в баках до начала дренирования, количество Na в баках системы хранения после дренирования составляет $600\text{--}610 \text{ м}^3$);
- выполнение мероприятий по безопасному хранению Na до его переработки;
- поэтапное дренирование Na из петель и ПТО второго контура;
- реализация проекта по розливу Na второго контура в 100-литровые барабаны и отправка его на АО «УМЗ» для использования в танталовом производстве и утилизации.

Для максимально возможного снижения количества радиоактивного Cs в первом контуре РУ БН-350 было произведено семь циклов очистки Na на стеклоуглеродном сорбенте. Начальную удельную активность Cs в первом контуре, равную $7,25 \cdot 10^8$ Бк/кг, удалось снизить в 2000 раз – до $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг [1].

Для переработки ЩЖМТ первого контура была спроектирована и смонтирована установка переработки Na (УПН), для чего был выбран метод перевода Na в 35%-ю щелочь растворением в воде с выделением эквивалентного количества пожаровзрывоопасного водорода. Реализация проекта УПН позволила бы обеспечить

- безопасность при выводе РУ БН-350 из эксплуатации;
- снижение эксплуатационных расходов;

© В.Б. Смыков, А.В. Журин, К.Г. Легких, В.В. Алексеев, В.П. Жданов, 2023

- решение проблемы обращения с большими объемами химически активных щелочных металлов;

- получение свободных объемов для удаления остатков натрия.

Но проект по различным причинам реализован не был.

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.

За время эксплуатации БН-350 накоплено 14 холодных фильтров-ловушек (ХФЛО) (пять первого контура, шесть второго контура, одна контура очистки эвтектического сплава NaK, две в узле приемки натрия), представляющих собой вертикальные герметичные сосуды высотой 5135 мм и диаметром 1050 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Все ХФЛО натриевых систем заморожены и заполнены натрием, объем одной ловушки 3,2 м³. Технологии дренирования натрия из ХФЛО и нейтрализации остатков натрия на БН-350 отсутствуют.

ТЕХНОЛОГИЯ ТВЕРДОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В ГНЦ РФ – ФЭИ разработана технология твердофазного окисления (ТФО) для переработки Na и сплава Na-K гранулированным шлаком медеплавильного производства Карабашского абразивного завода (Челябинская область). Экспериментальная (на стендах МИНЕРАЛ-3, Минерал-30, Минерал-50) и опытно-промышленная (на модуле МАГМА-ТФО) отработка технология ТФО Na и сплава Na-K подтвердила ее преимущества перед альтернативными предложениями [2]. С момента пуска в эксплуатацию в 2016 г. опытно-промышленной установки и до настоящего времени на ИР БР-10 на модуле МАГМА-ТФО переработаны в твердый шлакоподобный компаунд РАО слитого Na из второго контура и РАО слитого Na первого контура, а также РАО Na, дренированного из 13-ти ХФЛО первого контура (из 16-ти) и из двух ХФЛО второго контура. Реакционные емкости (РЕ) с твердым продуктом переработки РАО Na размещались в контейнерах НЗК-150-1,5 и передавались на временное хранение в цех радиоактивных отходов (ЦРО) ГНЦ РФ – ФЭИ. Осталось переработать РАО сплава NaKng из баков длительного хранения № 1 и № 2 и Na из трех оставшихся ХФЛО первого контура. В настоящее время по заказу АО «ТВЭЛ» на ИР БР-10 в сотрудничестве с ОИЦ «НИКИМТ-Атомстрой» осуществляется разработка и изготовление более производительной установки МИНЕРАЛ-100/150 с перспективой ее использования для переработки Na первого контура БОР-60 (работает с 1969 г.) и БН-600 (работает с 1980 г.) при выводе этих реакторов из эксплуатации.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ ТФО ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ НАТРИЯ ПЕРВОГО КОНТУРА РУ БН-350

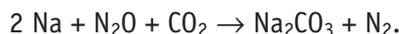
Для переработки натрия первого контура РУ БН-350, предварительно очищенного от изотопа Cs-137 (коэффициент очистки достигал 2000), сделана оценка уровня удельной радиоактивности продукта его переработки технологией ТФО в шлакоподобный компаунд. Показано, что с учетом удельной радиоактивности натрия $3,7 \cdot 10^5$ Бк цезия-137/кг после очистки продукт ТФО имеет удельную радиоактивность в пять-шесть раз ниже и будет уже относиться к низкоактивным РАО (удельная радиоактивность ниже $1 \cdot 10^5$ Бк/кг). При использовании для переработки натрия первого контура установки МИНЕРАЛ-100/150 данное обстоятельство позволяет использовать для длительного хранения или захоронения более емкий металлический защитный контейнер КМЗ, в котором можно расположить уже пять реакционных емко-

стей (РЕ) с твердым продуктом переработки натрия (вместо четырех РЕ в НЗК-150-1,5П). Кроме того, увеличение высоты внутреннего объема КМЗ на 200 мм (до 1110 мм) позволяет повысить высоту РЕ до 1100 мм и увеличить разовую загрузку в нее щелочного металла до 150 литров.

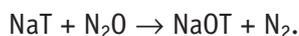
В варианте временного хранения отработанных РЕ с продуктом ТФО натрия первого контура РУ БН-350 в сухих (освобожденных от ОЯТ) бассейнах выдержки (БВ) для переработки накопленных 680 м³ радиоактивного Na потребуется приблизительно 4530–4540 штук РЕ, при квадратной укладке которых в БВ необходим объем около 2000 м³. Таким образом, имеющихся свободных объемов БВ 06/1 и БВ 06/2 (приблизительно 3500 м³) с избытком хватает для размещения всего объема переработанного Na первого контура и Na, слитого из отработанных ХФЛО, технологией ТФО, и отпадает необходимость строительства дополнительного хранилища отвержденных РАО на площадке РУ БН-350.

ПРОБЛЕМА НЕДРЕНИРУЕМЫХ ОСТАТКОВ ЩЕЛОЧНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И ЕЕ РЕШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ГАЗОФАЗНОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ

Применительно к переводу ХФЛО РУ БН-350 в пожаровзрывобезопасное состояние специалистами ИР БР-10 предложен метод газофазной нейтрализации недренируемых остатков натрия путем нейтрализации газовой смесью по схеме



В результате из натрия получается химически безопасный карбонат натрия и выделяется инертный газообразный азот. Взрывоопасный водород не образуется. Одновременно можно достичь химической нейтрализации гидридов и тритидов натрия в виде устойчивого вещества – твердой щелочи NaOH (NaOT) и предотвратить выделение водорода и (или) трития в защитный газ-носитель:



При наличии в газовой смеси CO₂ твердая щелочь переходит в гидрокарбонат натрия по известной реакции. К настоящему времени на ИР БР-10 обезврежены две ХЛО второго контура и 13 первого контура. На технологию газофазной нейтрализации получен патент РФ на изобретение [3, 4].

ПЕРЕРАБОТКА ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ БН-350

В настоящее время в хранилищах БН-350 накоплено более 1500 м³ жидких радиоактивных концентратов (ЖРК) с содержанием ~ 400г/л и средней активностью 1·10⁸ Бк/л (основные радионуклиды Cs-137, Sr-90). Данные отходы расположены в емкостях-хранилищах, большая часть которых находится в неудовлетворительном состоянии. Для переработки ЖРК БН-350 может быть предложен способ, включающий в себя окисление органических примесей, коагуляцию солей и сорбцию радионуклидов. В качестве сорбентов предполагается использовать модифицированные природные сорбенты – клиноптилолит и пиролюзит, а в качестве коагулянта – хлорное железо (табл. 1).

Степень сорбции широко используемого сорбента 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 98,9%. Но степень сорбции по схеме КЛН-MnO₂ и КЛН-Fe(OH)₃ для изотопа Co⁶⁰ существенно выше, чем у одного КЛН – до 93–98 % против 67,3 %. Вторичные РАО, образующиеся при реализации данной технологии, могут быть отверждены классическим цементированием или способом с большей степенью включения – шлакощелочным цементированием [5].

Таблица 1

Результаты экспериментов по очистке образцов ЖРК

| Радионуклид | Исходная активность, Бк/л | Степень сорбции для вариантов схем очистки, % | | |
|-------------------|---------------------------|---|----------------------|-------------------------|
| | | 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 |

ВЫВОДЫ

1. В ГНЦ РФ – ФЭИ на ИР БР-10 осуществлены разработка и применение новых безопасных технологий переработки РАО отработавших щелочных жидкометаллических теплоносителей (Na, NaK):

- твердофазное окисление (ТФО) для дренированных щелочных металлов;
- технология газофазного окисления (ГФО) недренируемых остатков щелочных металлов.

2. Создано и запущено в эксплуатацию новое оборудование для их практической реализации – опытно-промышленная установка в составе модулей МАГМА-ТФО и ЛУИЗА-РАО. Безопасность технологий и оборудования обеспечивается практическим отсутствием выделения водорода при переработке РАО щелочных металлов.

3. К концу 2023 г. предлагается создать и ввести в эксплуатацию на ИР БР-10 более производительную установку разовой производительностью 100–150 литров натрия (заказчик НИОКР – АО «ТВЭЛ») для вывода из эксплуатации БОР-60 (НИИАР), БН-600 (Белоярская АЭС) и, возможно, 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 высокосолевого ЖРК.

Литература

1. Тажибаева И., Пустобаев С., Жанткин Т., Ким А. и др. Обращение с натриевым теплоносителем реактора на быстрых нейтронах БН-350. – Алматы: Изд-во «Glory K ltd», 2010. – 320 с. ISBN 978-601-278-202-8.
2. Смыков В.Б. Проблемы вывода из эксплуатации быстрых реакторов и пути их решения на базе исследовательского реактора БР-10. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 90-102. DOI: <http://doi.org/10.26583/pre.2022.2.09>.
3. Смыков В.Б., Легких К.Г. Газофазное окисление как метод нейтрализации недренируемых остатков щелочных ЖМТ в оборудовании. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – Вып. 4 – С. 145-148. ISSN: 2414-1038.
4. Смыков В.Б., Пронин А.А., Легких К.Г. Способ перевода оборудования с недренируемыми остатками щелочного металла во взрывопожаробезопасное состояние и устройство его осуществления. – Патент РФ № 2794139. – 2023.
5. Скоморохова С.Н., Коновалов Э.Е., Старков О.В., Кочеткова Е.А., Копылов В.С., Полетахина Т.В., Трифанова Е.М. Обезвреживание радиоактивных отходов щелочных металлов переработкой в щелочной раствор и отверждением в геоцементный камень. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 3. – С.58-66.

Поступила в редакцию 03.08.2023 г.

Авторы

Смыков Владимир Борисович, зам. начальника отдела, канд. техн. наук

E-mail: smukov@ippe.ru

Журин Андрей Владимирович, начальник отдела

E-mail: manakova@ippe.ru

Легких Кристина Геннадьевна, начальник лаборатории

E-mail: kglegkikh@ippe.ru

Алексеев Виктор Васильевич, главный научный сотрудник, д-р техн. наук

E-mail: alexeev@ippe.ru

Жданов Виктор Петрович, ведущий инженер

E-mail: vpzhdanov@ippe.ru

UDC 621.181.6

Reprocessing of Primary and Secondary Coolants During the BN-350 Reactor Decommissioning

Smykov V.B., Zhurin A.V., Legkikh K.G., Alexeev V.V., Zhdanov V.P.

IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The BN-350 was the world's first pilot production liquid metal cooled fast reactor. The reactor's design thermal power was 1000 MW. The power startup of the reactor took place in July 16, 1973. The decision to decommission the BN-350 reactor was made in 1999 by the Government of the Republic of Kazakhstan. Unfortunately, no RW reprocessing technologies were available at the time, including for spent alkali liquid metal coolants (primary sodium). An individual problem is reprocessing of spent cold filter trap oxides (CFTO) in the primary and secondary circuits. The most difficult task is to reprocess the accumulated liquid radioactive water concentrates (liquid waste, LW). The amount of aqueous LW will grow during the decommissioning activity.

Key words: spent alkaline liquid metal coolant, sodium, sodium-potassium alloy, BN-350 reactor, BR-10 research reactor, solid-phase oxidation, slag, gas-phase oxidation, slag-like compound, solid matrix, liquid radioactive concentrates, clinoptilolite.

For citation: Smykov V.B., Zhurin A.V., Legkikh K.G., Alexeev V.V., Zhdanov V.P. Reprocessing Of Primary And Secondary Coolants During The BN-350 Reactor Decommissioning. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 164-169; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.16> (in Russian).

REFERENCES

1. Tazhibaeva I., Pustobaev S., Zhantikin T., et al. (44 authors). The Handling with Sodium Coolant at Fast Reactor BN-350. Almaty. Glory K ltd Publ., 2010, 320 p. ISBN 978-601-278-202-8 (in Russian).
2. Smykov V.B. Problems of Decommissioning Fast Reactors and Ways of their Solution on the Basis of the BR-10 Research Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 2, pp. 90-102. DOI: <http://doi.org/10.26583/npe.2022.2.09> (in Russian).
3. Smykov V.B., Legkikh K.G. Gas-Phase Oxidation as a Method of Neutralization of Non-Drainable ALMC Residues in Equipment. *VANT. Ser.: Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2022, iss. 4, pp. 145-148. ISSN: 2414-1038 (in Russian).

4. *Smykov V.B., Pronin A.A., Legkikh K.G.* The Way of Conversion the Equipment with Non-Drainable Residues of Alkali Metal in Safe State and Apparatus for their Realization. – Patent RF No. 2794139. 2023 (in Russian).

5. *Skomorokhova C.N., Kononov E.E., Starkov O.V., Kotchetkova E.A., Kopylov V.C., Poletakhina T.V., Trifanova E.M.* Harmless the RW of Alkali Metals by Processing in Alkali Water Solution then into the Geo-Cement Stone. *Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika.* 1999, no. 3, pp. 58-66 (in Russian).

Authors:

Vladimir B. Smykov, Deputy Head of Division, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: smykov@ippe.ru

Andrey V. Zhurin, Head of Division,

E-mail: manakova@ippe.ru

Kristina G. Legkikh, Head of Laboratory,

E-mail: kglegkikh@ippe.ru

Victor V. Alexeev, Principal Scientist, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: alexeev@ippe.ru

Victor P. Zhdanov, Leading Engineer,

E-mail: vpzhdanov@ippe.ru