

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 2. С. 33–43  
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(2):33-43

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 614.876

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43>

## Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя

Любим Николаевич Прытков ✉, Николай Михайлович Барбин,  
Станислав Андреевич Титов

Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Атомные электростанции Российской Федерации вырабатывают около 20 % доли общей электроэнергии. На базе реакторов на быстрых нейтронах в качестве теплоносителя, где применяется натрий, Госкорпорацией «Росатом» реализуется проект «Прорыв», нацеленный на реализацию замкнутого ядерного топливного цикла за счет применения энергетического потенциала природного урана. Изучение и обобщение информации о пожарной и радиационной опасности натриевого теплоносителя является актуальной задачей для обеспечения безопасности при эксплуатации реакторов данного типа.

**Цели и задачи.** Целью статьи является аналитическое исследование информации о радиационной и пожарной опасности натриевого теплоносителя, опубликованной в отечественной и зарубежной научной литературе. Для ее достижения проведен анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире, рассмотрены теплоносители, применяемые в быстрых реакторах. Проведен системный анализ радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, представлены сравнительные диаграммы по показателям радиационных свойств радионуклидов, определены наиболее опасные для человека радионуклиды, присутствующие в натриевом теплоносителе. Проанализированы пожарная опасность металлического натрия и особенности тушения пожаров, связанных с утечкой натриевого теплоносителя в первом и втором контуре реакторной установки.

**Результаты и их обсуждение.** На данный момент в мире эксплуатируется 1 опытно-промышленный реактор на быстрых нейтронах, находящийся в России, 1 экспериментальный реактор в Индии и в Китае. В качестве теплоносителя на данных реакторах применяется натрий. В результате анализа литературы из открытых источников установлено, что основными источниками образования примесей в металлическом теплоносителе являются защитный газ, конструкционные и технологические материалы установки и продукты ядерных реакций. Проведенный системный анализ свойств радионуклидов, присутствующих в металлическом теплоносителе, позволил определить наиболее опасные из них для жизни и здоровья человека. Пожарная опасность натриевого теплоносителя обусловлена в основном его химической активностью. Основными способами тушения разлитого натрия является изолирование от кислорода за счет засыпания лужи металлического натрия порошком огнегасящим МГС, порошкообразным оксидом алюминия или уменьшение концентрации кислорода в воздухе ниже 4 % за счет объемного газового пожаротушения азотом, углекислотой или инертными газами.

**Выводы.** В результате проведенного анализа радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах, установлено, что наиболее опасными для человека являются  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ . По результатам анализа пожарной опасности радиоактивного натрия установлены наиболее распространенные огнетушащие вещества и описаны особенности тушения пожаров, возникающих при возгорании натриевого теплоносителя.

**Ключевые слова:** пожар; радионуклид; примеси; огнетушащий состав; тушение пожара; выброс радиоактивности

**Для цитирования:** Прытков Л.Н., Барбин Н.М., Титов С.А. Радиационная и пожарная опасность натриевого теплоносителя // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 33–43. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43

✉ Прытков Любим Николаевич, e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

## Radiation and fire hazard of sodium coolant

Lyubim N. Prytkov ✉, Nikolay M. Barbin, Stanislav A. Titov

Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** Nuclear power plants in the Russian Federation produce about 20 % of the total electricity. On the basis of fast neutron reactors using sodium as a coolant, Rosatom State Corporation is implementing the “Breakthrough” project aimed at the implementation of a nuclear fuel cycle using the energy potential of natural uranium. Study and generalization of information about fire and radiation hazards of sodium coolant is an urgent task to ensure safety in the operation of this type of reactors.

**Goals and objectives.** The purpose of the article is an analytical study of information about sodium coolant radiation and fire hazard, published in domestic and foreign scientific literature. To achieve it, an analysis of fast neutron reactors operating in the world was carried out, the coolants used in fast reactors were considered. System analysis of radionuclides present in sodium coolant has been carried out, comparative diagrams according to radionuclide radiation properties are presented, the most dangerous radionuclides for humans present in the sodium coolant have been identified. The fire hazard of sodium metal and peculiarities of extinguishing fires associated with the leakage of sodium coolant in the primary and secondary circuits of the reactor plant are analyzed.

**Results and its discussion.** At the present time, there is 1 experimental-industrial fast neutron reactor in operation in the world, located in Russia, and 1 experimental reactor in India and China. Sodium is used as a coolant in these reactors. As a result of the literature analysis from open sources, it was found that the main sources of impurities in the metal coolant are protective gas, structural and technological materials of the installation, and products of nuclear reactions. A systematic analysis of the properties of radionuclides present in the metal coolant made it possible to determine the most dangerous of them for human life and health. The fire hazard of sodium coolant is mainly due to its chemical activity. The main ways of extinguishing spilled sodium is isolation from oxygen by covering the puddle of metallic sodium with powdered fire-extinguishing MHS, powdered aluminum oxide or reduction of oxygen concentration in the air below 4 % by volume gas extinguishing with nitrogen, carbon dioxide or inert gases.

**Conclusions.** As a result of the analysis of radionuclides present in the sodium coolant of a fast neutron reactor, it was found that the most dangerous for people are  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ . Based on the results of the analysis of the fire hazard of radioactive sodium, the most common fire extinguishing agents are established and the features of extinguishing fires that occur when a sodium coolant ignites are described.

**Keywords:** fire; radionuclide; impurities; fire extinguishing composition; fire extinguishing; release of radioactivity

**For citation:** Prytkov L.N., Barbin N.M., Titov S.A. Radiation and fire hazard of sodium coolant. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):33-43. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.33-43 (rus).

✉ Lyubim Nikolaevich Prytkov, e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

## Введение

Около 20 % доли электроэнергии в Российской Федерации вырабатывается на атомных электростанциях, которые вносят значительный вклад в борьбу с глобальным потеплением, предотвращая выброс в атмосферу порядка 100 млн тонн  $\text{CO}_2$ . Всего на территории России эксплуатируется 37 энергоблоков, из которых 22 энергоблока с реакторами типа ВВЭР (4 энергоблока с ВВЭР-1200, 13 энергоблоков с ВВЭР-1000 и 5 энергоблоков с ВВЭР-440 различных модификаций); 11 энергоблоков с канальными реакторами (8 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 и 3 энергоблока с ЭГП-6); 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) и 2 реакторные установки типа КЛТ-40С в составе плавучей атомной теплоэлектростанции. Общая электрическая мощность 11 атомных электростанций России составляет 29,5 ГВт [1].

Основу мировой ядерной энергетики в настоящее время составляют реакторы на тепловых нейтронах. К основным преимуществам тепловых реакторов можно отнести:

- большой опыт, накопленный в ходе эксплуатации;
- высокий уровень безопасности;

- высокий уровень коммерческой реализации данных типов АЭС.

Основным минусом технологии реакторов на тепловых нейтронах является применение урана-235 в качестве топлива, который составляет порядка 0,7 % в природном уране, оставшиеся 99,3 % составляет уран-238, который для тепловых реакторов не может применяться в качестве ядерного топлива, так как практически не делится в спектре тепловых нейтронов, а проблема обращения с отработавшим ядерным топливом не позволяет однозначно отнести ядерную энергетику к разряду устойчивых.

Всего в недрах нашей планеты имеется около 10–14 млн тонн урана, порядка 4 млн из них уже израсходовано.

По мнению экспертов, при работе только реакторов на тепловых нейтронах, которые составляют сегодня основу мировой ядерной энергетики, уже к концу XXI в. запасы урана-235 исчерпаются, следовательно, атомная энергетика, построенная только на основе тепловых реакторов, имеет такой же недостаток, что и традиционная энергетика на органическом топливе — исчерпаемость топливных ресурсов.

В реакторе на быстрых нейтронах основным делящимся материалом является плутоний-239, кото-

рый образуется из урана-238 при захвате нейтрона, при этом возможна наработка плутония в количествах, превышающих потребности самого реактора, поэтому реакторы на быстрых нейтронах называют размножителями.

Таким образом, реакторы на быстрых нейтронах дают возможность практически полного использования энергетического потенциала природного урана.

Эти два типа реакторов могут успешно работать в единой системе, в которой реакторы на быстрых нейтронах будут осуществлять расширенное воспроизводство топлива с вовлечением плутония, накапливаемого в тепловых реакторах, а также в перспективе трансмутировать минорные актиниды, являющиеся наиболее опасными радиоактивными отходами.

В связи с этим следует отметить, что внедрение реакторов на быстрых нейтронах является условием, способствующим развитию крупномасштабной ядерной энергетики.

При эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах возможно решить важнейшую задачу — создание замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), при котором переработка отработавшего ядерного топлива будет циклически повторяться и будет создаваться на основе выделенного плутония новое топливо для атомной энергетики.

Решение этой задачи позволит:

- осуществить расширенное воспроизводство уран-плутониевого топлива с вовлечением в него плутония, накапливаемого и в тепловых реакторах, а также оружейного плутония, увеличив эффективность использования природного урана в ~100 раз;
- выделить радиоактивные отходы тепловых и быстрых реакторов, образующиеся в процессе ядерных реакций;
- обеспечить в перспективе выжигание наиболее опасных радиоактивных отходов — трансурановых элементов (изотопов нептуния, америция, кюрия с большим периодом полураспада).

Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных реакторов с учетом опыта чрезвычайных ситуаций и инцидентов на данных объектах [2–7] является чрезвычайно актуальной задачей.

С учетом вышесказанного целью настоящей статьи является аналитическое исследование информации о радиационной и пожарной опасности натриевого теплоносителя, опубликованной в отечественной и зарубежной научной литературе.

Для достижения указанной цели в рамках статьи необходимо провести анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире, и теплоносителей, применяемых в данных реакторах. Провести системный анализ радионуклидов, при-

сутствующих в натриевом теплоносителе, их радиационных свойств, определить наиболее опасные радионуклиды для здоровья человека. Проанализировать пожарную опасность металлического натрия и особенности его тушения при утечке в первом и втором контуре реакторной установки.

### **Анализ реакторов на быстрых нейтронах, эксплуатирующихся в мире**

Перспективность применения реакторов на быстрых нейтронах изучалась во многих странах, в СССР в 1955 г. был запущен первый экспериментальный реактор на быстрых нейтронах БР-1, на котором впервые в мире была экспериментально доказана возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива. На основании данных с официального сайта Физико-энергетического института имени А.И. Лейпунского, быстрые реакторы, работающие в мире на данный момент, представлены в табл. 1.

Компоновка АЭС на быстрых нейтронах обычно является интегральной, при которой все элементы первого контура — реактор, теплообменники, главные циркуляционные насосы расположены в пределах одного корпуса.

### **Теплоносители, применяемые в быстрых реакторах**

Вопрос выбора оптимального теплоносителя для быстрых реакторов исследовался многими учеными во всем мире, так как от выбора оптимального теплоносителя зависит надежная и длительная работа ядерной энергетической установки [8–11]. При выборе теплоносителя учитывалось:

- тип, назначение, параметры установки;
- применяемые конструкционные и технологические материалы;
- влияние теплоносителя на ядерно-физические характеристики активной зоны;
- возможность максимального исключения паразитного захвата нейтронов;
- способность теплоносителя к формированию необходимого для определенного типа реактора спектра нейтронов и росту коэффициента воспроизводства;
- возможные аварийные ситуации, влияние теплоносителя на их развитие и ликвидацию последствий;
- возможные затруднения при проведении обслуживающих и ремонтных работ ядерной установки;
- стоимость теплоносителя, оборудования и материалов для реализации нормального технологического процесса;

**Таблица 1.** Быстрые реакторы, работающие в мире  
**Table 1.** Fast reactors operating in the world

| Реактор<br>Reactor | Характеристики реактора<br>Reactor characteristics                          | Мощность<br>(тепловая/электрическая)<br>Power (thermal/electric) | Топливо<br>Fuel                          | Страна<br>Country | Годы<br>эксплуатации<br>Years of operation |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| БОР-60<br>BOR-60   | Исследовательский, петлевой, натрий<br>Research, loop, sodium               | 55/10                                                            | Оксид<br>Oxide                           | Россия<br>Russia  | 1969–2020                                  |
| БН-600<br>BN-600   | Опытно-промышленный, интегральный, натрий<br>Industrial, integrated, sodium | 1470/600                                                         | Оксид<br>Oxide                           | Россия<br>Russia  | 1980–2020                                  |
| БН-800<br>BN-800   | Опытно-промышленный, интегральный, натрий<br>Industrial, integrated, sodium | 2100/800                                                         | МОКС<br>Mixed-Oxide fuel                 | Россия<br>Russia  | 2016–2043                                  |
| FBTR               | Экспериментальный, интегральный, натрий<br>Experimental, integrated, sodium | 40/13,2                                                          | Карбид (металл)<br>Carbide (metal)       | Индия<br>India    | 1985–2030                                  |
| PFBR               | Прототип, интегральный, натрий<br>Prototype, integrated, sodium             | 1250/500                                                         | Оксид (металл)<br>Oxide (metal)          | Индия<br>India    | —                                          |
| CEFR               | Экспериментальный, интегральный, натрий<br>Experimental, integrated, sodium | 65/20                                                            | Оксид (МОКС)<br>Oxide (Mixed-Oxide fuel) | Китай<br>China    | 2010–2040                                  |
| Joyo               | Экспериментальный, интегральный, натрий<br>Experimental, integrated, sodium | 140/—                                                            | Оксид<br>Oxide                           | Япония<br>Japan   | 1978–2007                                  |
| Monju              | Прототип, петлевой, натрий<br>Prototype, loopback, sodium                   | 714/280                                                          | Оксид<br>Oxide                           | Япония<br>Japan   | 1994–1996, 2010                            |

- способность теплоносителей образовывать в значительных количествах изотопы с большим периодом полураспада в результате ядерной реакции и многие другие вопросы.

В ходе исследований было установлено, что вода, органические теплоносители и кремнийорганические соединения были непригодны для быстрых реакторов, в связи с этим в качестве теплоносителей рассматривались жидкие металлы, газы и пар.

Применение в качестве теплоносителя сухого пара имело ряд существенных проблем:

- снижение коэффициента воспроизводства;
- возрастание удельной загрузки топлива;
- серьезные проблемы с аварийным расхолаживанием и теплосъемом в процессе перегрузки топлива.

Среди газов, применяемых в качестве теплоносителя, рассматривалась возможность применения гелия, углекислого газа и тетраоксида диазота  $N_2O_4$ . Существенным преимуществом в случае применения газов в качестве теплоносителя для быстрых реакторов являлось повышение коэффициента воспроизводства по сравнению с натрием.

Однако серьезные проблемы возникали в случае необходимости процесса аварийного расхолаживания и из-за возможной разгерметизации контура.

В результате исследований и поисков оптимального вещества, применяемого в качестве теплоносителя для быстрых реакторов, предпочтение было отдано жидким металлам, а среди них — натрию. Данный выбор объясняется хорошими теплофизическими свойствами натрия, которые позволяют осуществлять интенсивный теплосъем как при нормальном режиме эксплуатации ядерной установки, так и в случае аварийного расхолаживания за счет естественной конвекции.

Применение таких тяжелых жидких металлов как висмут, свинец, олово и их сплавы в качестве теплоносителя имело существенный недостаток, связанный с коррозионной активностью данных металлов по отношению к конструкционным материалам ядерной установки.

Проблема поиска высокотемпературных теплоносителей с наиболее оптимальными параметрами имеет особую важность в связи с процессами интенсификации современных энергетических установок.

Верхний температурный предел применения жидких металлов в качестве теплоносителя определяется исходя из его коррозионного воздействия на материалы конструкции установки, температурой кипения при определенном давлении. Высокие коэффициенты теплоотдачи у жидких металлов значительно превышают коэффициенты теплоотдачи других возможных веществ, которые возможно применить в качестве теплоносителей, что свидетельствует о перспективности применения в качестве теплоносителей жидких металлов.

Жидкометаллические теплоносители нашли применение в ядерной энергетике, в Российской Федерации на Белоярской АЭС успешно функционирует 1 промышленный реактор БН-800. В качестве теплоносителя в данном реакторе применяется металлический натрий. Коммерческий натрий получают при помощи электролиза расплавленного хлорида натрия, с добавлением расплава хлорида кальция для уменьшения температуры плавления [12].

### Примеси в теплоносителе

Примеси в теплоносителе неизбежно присутствуют и могут способствовать образованию отложений на поверхностях установок, повышенным коррозионным эффектам и ухудшению радиационной обстановки на установке.

Допустимые концентрации примесей ограничиваются следующими факторами:

- радиационной обстановкой, создаваемой при взаимодействии примесей с ядерным излучением;
- влиянием на ядерно-физические свойства реактора;
- коррозионным воздействием примесей на конструкционные детали ядерной установки;
- исключением образования отложений примесей на поверхности установки, контактирующей с теплоносителем.

Примеси в теплоносителе разделяются на:

- имеющиеся в исходном теплоносителе;
- появляющиеся в процессе эксплуатации установки в штатном режиме при проведении ремонтных работ и возникающие в результате аварийных ситуаций.

Количество примесей в исходном теплоносителе зависит от технологии производства, используемого сырья и условий хранения до загрузки в ядерную энергетическую установку. Концентрации примесей, появляющихся в теплоносителе в процессе эксплуатации установки со временем, увеличиваются. Основными источниками образования примесей в процессе эксплуатации ядерной установки являются:

- защитный газ;
- конструкционные и технологические материалы установки;

- продукты ядерных реакций;
- имеющиеся неплотности технологического оборудования [13–17].

Содержание примесей в натрии, применяемом в качестве теплоносителя в реакторе EBR-II (Франция), приведено в табл. 2 [18].

Радионуклиды естественного и искусственного происхождения оказывают негативное воздействие на человеческий организм. Ввиду серьезной опасности радионуклидов необходимо иметь представление о характеристиках радиоактивных элементов. На основании справочных данных о примесях в натриевом теплоносителе реактора EBR-II (Франция) [18] проведен системный анализ по определению наиболее опасных для человека радионуклидов из числа примесей в натриевом теплоносителе.

В соответствии с Постановлением<sup>1</sup> радионуклиды делятся на 4 группы радиационной опасности (А, Б, В, Г) в зависимости от параметра минимально значимой суммарной активности (табл. 3).

Системный анализ был проведен на основании свойств радионуклидов, указанных в [19]: период полураспада, средняя энергия характеристического  $\gamma$ - и аннигиационного излучения, средняя энергия  $\beta$ -излучения, электронов Оже, а также конверсионных электронов.

Свойства радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, представлены в табл. 4.

Наиболее опасными радионуклидами по периоду полураспада являются:  $^{239}\text{Pu}$  — 24 065 лет,  $^{137}\text{Cs}$  — 30 лет,  $^{125}\text{Sb}$  — 2,77 года,  $^{22}\text{Na}$  — 2,602 года,  $^{54}\text{Mn}$  — 312,5 суток,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  — 249,9 суток. Наиболее опасные радионуклиды по периоду полураспада схематично представлены на рис. 1.

Проанализировав среднюю энергию  $\beta$ -излучения, конверсионных электронов и электронов Оже, следует отметить, что наиболее опасными являются:  $^{24}\text{Na}$  — 0,553 МэВ/Бк·с,  $^{22}\text{Na}$  — 0,194 МэВ/Бк·с,  $^{131}\text{I}$  — 0,19 МэВ/Бк·с,  $^{137}\text{Cs}$  — 0,187 МэВ/Бк·с,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  — 0,161 МэВ/Бк·с,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,0993 МэВ/Бк·с. Наиболее опасные радионуклиды средней энергии  $\beta$ -излучения, электронов Оже и конверсионных электронов схематично представлены на рис. 2.

В соответствии с данными о средней энергии характеристического  $\gamma$ - и аннигиационного излучения радионуклидов можно сделать вывод, что наиболее опасными являются:  $^{24}\text{Na}$  — 4,12 МэВ/Бк·с,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  — 2,74 МэВ/Бк·с,  $^{54}\text{Mn}$  — 0,835 МэВ/Бк·с,  $^{125}\text{Sb}$  — 0,43 МэВ/Бк·с,  $^{131}\text{I}$  — 0,38 МэВ/Бк·с,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  — 0,158 МэВ/Бк·с. Наиболее опасные радионуклиды по средней энергии характеристического  $\gamma$ - и анни-

<sup>1</sup> Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523–09. Приложение 4 : Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47.

**Таблица 2.** Содержание примесей в натрии в реакторе EBR-II  
**Table 2.** The content of impurities in sodium in the EBR-II reactor

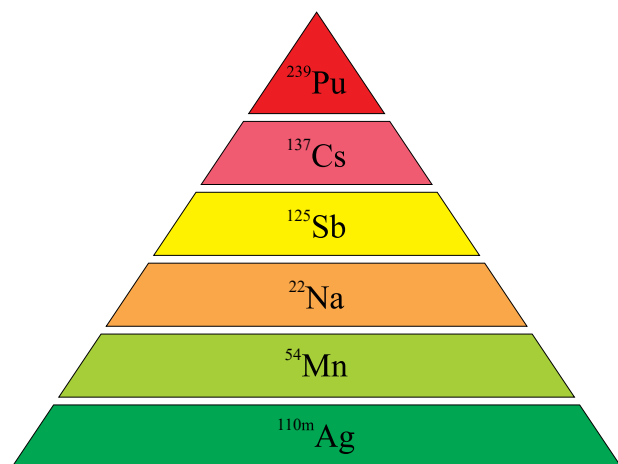
| Элемент<br>(радионуклид)<br>Element (radionuclide) | Массовая концентрация, $C \cdot 10^{-4}, \%$<br>Mass concentration, $C \cdot 10^{-4}, \%$ |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| O <sub>2</sub>                                     | 1,1                                                                                       |
| H <sub>2</sub>                                     | 0,1                                                                                       |
| C                                                  | 0,2                                                                                       |
| B                                                  | 0,05                                                                                      |
| Bi                                                 | 2,9                                                                                       |
| Cr                                                 | 0,02                                                                                      |
| Fe                                                 | 0,07                                                                                      |
| Li                                                 | 0,0005                                                                                    |
| Ni                                                 | 0,04                                                                                      |
| Si                                                 | 0,2                                                                                       |
| Sn                                                 | 37                                                                                        |
| Mn                                                 | 0,005                                                                                     |
| <sup>22</sup> Na                                   | 90 нКи/г<br>90 nCi/g                                                                      |
| <sup>24</sup> Na                                   | 2,6 мКи/г<br>2.6 mCi/g                                                                    |
| <sup>54</sup> Mn                                   | 0,2 нКи/г<br>0.2 nCi/g                                                                    |
| <sup>110m</sup> Ag                                 | 2 нКи/г<br>2 nCi/g                                                                        |
| <sup>113m</sup> I                                  | 22 нКи/г<br>22 nCi/g                                                                      |
| <sup>117m</sup> Sn                                 | 11 нКи/г<br>11 nCi/g                                                                      |
| <sup>125</sup> Sb                                  | 3,6 нКи/г<br>3.6 nCi/g                                                                    |
| <sup>131</sup> I                                   | 22 нКи/г<br>22 nCi/g                                                                      |
| <sup>137</sup> Cs                                  | 64 нКи/г<br>64 nCi/g                                                                      |
| <sup>210</sup> Po                                  | 160 пКи/г<br>160 pCi/g                                                                    |
| <sup>239</sup> Pu                                  | 0,3 пКи/г<br>0.3 pCi/g                                                                    |

**Таблица 3.** Группы радиационной опасности  
**Table 3.** Radiation hazard groups

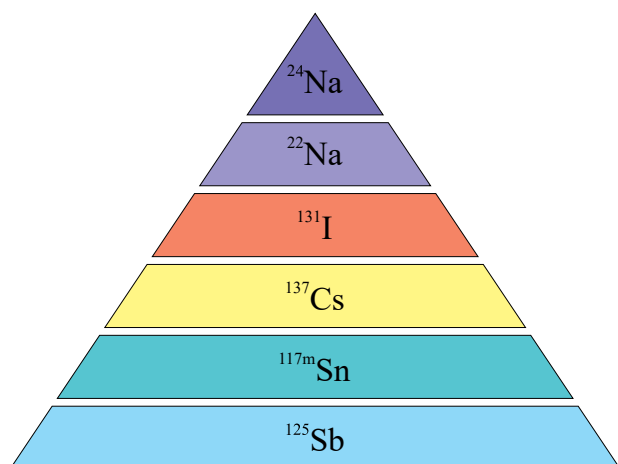
| Группа<br>Group | Минимально значимая<br>суммарная активность<br>Minimum significant total activity | Нуклид<br>Nuclide                                                                                 |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A               | $1 \cdot 10^3$ Бк<br>$1 \cdot 10^3$ Bq                                            | —                                                                                                 |
| Б<br>B          | $1 \cdot 10^4$ и $1 \cdot 10^5$ Бк<br>$1 \cdot 10^4$ and $1 \cdot 10^5$ Bq        | <sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Po,<br><sup>239</sup> Pu, <sup>24</sup> Na                      |
| В<br>C          | $1 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^7$ Бк<br>$1 \cdot 10^6$ and $1 \cdot 10^7$ Bq        | <sup>110m</sup> Ag, <sup>131</sup> I,<br><sup>125</sup> Sb, <sup>22</sup> Na,<br><sup>54</sup> Mn |
| Г<br>D          | $1 \cdot 10^8$ и $1 \cdot 10^9$ Бк<br>$1 \cdot 10^8$ and $1 \cdot 10^9$ Bq        | —                                                                                                 |

**Таблица 4.** Свойства радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе  
**Table 4.** Properties of radionuclides present in sodium coolant

| Нуклид<br>Nuclide  | Период полураспада<br>Half life | Средняя энергия излучения,<br>МэВ/Бк·с<br>Average radiation energy,<br>MeV/Bq·s                                   |                                                                                                                            |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                 | характеристическое $\gamma$ - и аннигиляционное излучение<br>characteristic $\gamma$ - and annihilation radiation | $\beta$ -излучение, конверсионные электроны и электроны Оже<br>$\beta$ radiation, conversion electrons and Auger electrons |
| <sup>22</sup> Na   | 2,602 года<br>2.602 years       | —                                                                                                                 | $1,94 \cdot 10^{-1}$                                                                                                       |
| <sup>24</sup> Na   | 15 ч<br>15 hours                | 4,12                                                                                                              | $5,53 \cdot 10^{-1}$                                                                                                       |
| <sup>54</sup> Mn   | 312,5 суток<br>312.5 days       | $8,35 \cdot 10^{-1}$                                                                                              | $4,22 \cdot 10^{-3}$                                                                                                       |
| <sup>110m</sup> Ag | 249,9 суток<br>249.9 days       | 2,74                                                                                                              | $7,13 \cdot 10^{-2}$                                                                                                       |
| <sup>117m</sup> Sn | 13,61 суток<br>13.61 days       | $1,58 \cdot 10^{-1}$                                                                                              | $1,61 \cdot 10^{-1}$                                                                                                       |
| <sup>125</sup> Sb  | 2,77 года<br>2.77 years         | $4,3 \cdot 10^{-1}$                                                                                               | $9,93 \cdot 10^{-2}$                                                                                                       |
| <sup>131</sup> I   | 8,04 суток<br>8.04 days         | $3,8 \cdot 10^{-1}$                                                                                               | $1,9 \cdot 10^{-1}$                                                                                                        |
| <sup>137</sup> Cs  | 30 лет<br>30 years              | —                                                                                                                 | $1,87 \cdot 10^{-1}$                                                                                                       |
| <sup>210</sup> Po  | 138,38 суток<br>138.38 days     | $8,5 \cdot 10^{-6}$                                                                                               | $8,18 \cdot 10^{-8}$                                                                                                       |
| <sup>239</sup> Pu  | 24 065 лет<br>24,065 years      | $7,96 \cdot 10^{-4}$                                                                                              | $6,65 \cdot 10^{-3}$                                                                                                       |



**Рис. 1.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по периоду полураспада  
**Fig. 1.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the half-life



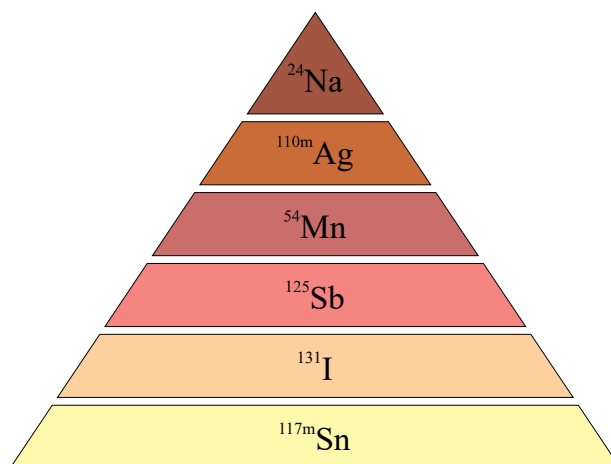
**Рис. 2.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по средней энергии  $\beta$ -излучения, электронов Оже и конверсионных электронов  
**Fig. 2.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the average energy of  $\beta$ -radiation, Auger electrons and conversion electrons

лигационного излучения схематично представлены на рис. 3.

Проведя системный анализ опасности радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, можно сделать вывод, что наибольшую опасность для жизни и здоровья людей представляют следующие радионуклиды:  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{131}\text{I}$ .

### Пожарная опасность натриевого теплоносителя

Химическая активность натрия является основной проблемой при его эксплуатации в качестве теплоносителя. Данный металлический теплоноситель взаимодействует со многими металлами при относительно низкой температуре, что связано



**Рис. 3.** Схема расположения радионуклидов, присутствующих в натриевом теплоносителе, по средней энергии характеристического  $\gamma$ - и аннигиляционного излучения  
**Fig. 3.** Scheme of the arrangement of radionuclides present in the sodium coolant, according to the average energy of the characteristic  $\gamma$ - and annihilation radiation

с наличием примесей окислов натрия. Предотвратить взаимодействие с цинком, нержавеющей сталью и другими металлами возможно за счет очищения натрия от окислов. Нагревание теплоносителя приводит к взаимодействию с водородом, серой, оксидами некоторых металлов, углеродом и диоксидом кремния. Натриевый теплоноситель не взаимодействует с инертными газами, бензином, парафином и минеральным маслом [20]. Химическая активность натрия с водой и с атмосферой воздуха создает определенные сложности при его тушении.

Возгорание радиоактивного натрия из первого или второго контура реактора является серьезной опасностью для участников тушения пожара ввиду образования высокой концентрации активности в реакторном зале.

В научных работах А.К. Микеева [21, 22] скорость истечения натрия составляет около 10 л/с. Натрий из первого или второго контура реактора воспламеняется в атмосфере воздуха при 280–350 °С. При эксплуатации натриевого теплоносителя его температура составляет от 300 до 550 °С и, как следствие, при попадании в атмосферу воздуха сразу же воспламеняется.

Горение натриевого теплоносителя сопровождается образованием густого белого дыма — до 40 % продуктов горения может перейти в аэрозоли. Основу смеси аэрозолей составляют оксиды натрия, а при значительной влажности воздуха — гидроксид. Химическая активность аэрозольных частиц способствует причинению серьезных повреждений оборудованию, находящемуся в помещении пожара, и представляет особую опасность для человека.

Особенности тушения жидкометаллического натрия рассматриваются в Стандарте и Рекомендациях<sup>2,3</sup>.

В качестве огнетушащих средств натриевого теплоносителя применяются порошковые и газообразные вещества. Порошковые огнетушащие средства, подаваемые на поверхность горящего теплоносителя, изолируют его от кислорода и подавляют горение. Недостатками данных средств являются:

- низкая теплопередача;
- сложность доставки к месту пожара по трубопроводам;
- слеживаемость при хранении;
- поглощение влаги.

Для тушения натриевого теплоносителя наиболее распространенными являются: порошок огнетушащий МГС и порошкообразный оксид алюминия — глинозем. При тушении натрия порошком происходит его смачивание и порошковый состав тонет в луже металла, данный факт способствует большому расходу огнетушащего порошка. Эффективное применение порошковых средств пожаротушения возможно лишь в случае, если толщина слоя разлившегося теплоносителя составляет не более 50 мм. Расход порошка МГС при тушении 1 м<sup>2</sup> натрия толщиной 30–40 мм составляет 8 кг, расход глинозема при аналогичных условиях составляет 60 кг.

Газообразные средства при возгорании металлического натрия прекращают его горение за счет снижения концентрации кислорода ниже 4 %. Эффективность тушения очага пожара газом во многом зависит от герметичности помещения. При экспериментальной проверке газового тушения металлического натрия оказалось, что в результате тушения азотом или аргоном на поверхности металла образуются соединения, снижающие температуру самовоспламенения до 70 °С. Данный недостаток был устранен введением в основной газ углекислоты в объемном содержании 4 % или более. В результате температура самовоспламенения возросла до 260 °С.

### **Пожары натриевого теплоносителя на атомных электростанциях**

Данные о пожарах натриевого теплоносителя на атомных электростанциях были взяты из учебного пособия [23].

<sup>2</sup> СТО 1.1.1.04.001.1500–2018. Правила пожарной безопасности при эксплуатации атомных станций.

<sup>3</sup> МР 1.3.3.99.0227–2014. Тушение пожара на объектах с обращением жидкометаллического натрия АС с реактором БН. Особенности применения первичных и стационарных средств пожаротушения. Методические рекомендации.

На реакторе БР-5 (СССР) в марте 1959 г. произошел прожог трубопровода 1-го контура за счет дуги, возникшей при замыкании электронагревателей, что привело к выбросу радиоактивного газа и разливу около 2 кг металлического натрия. Данный инцидент был обнаружен за счет показаний уровня и изменения давления аргона в газовой полости насоса 2-го контура. Ликвидация последствий аварии заняла около 1,5 мес. Личный состав, проводивший осмотр места течи и уборку натрия, применял кожаную спецодежду и шлемы с принудительной подачей воздуха.

На Белоярской АЭС (СССР) на реакторе БН-350 21 марта 1973 г. в результате ошибки персонала был включен электрообогрев на замороженном участке трубопровода, отделявшем место ремонта от работающей петли, натрий был подан на разгерметизированный узел петли 2-го контура. Течь составила порядка 20 кг и была устранена закрытием отсечной арматуры узла индикации. Пожар продолжался около 40 мин и был потушен глиноземом.

6 октября 1973 г. при работе реактора из-за недостатков конструкции пробоотборника 2-го контура и ошибки персонала произошел выброс 3–5 кг натрия с возгоранием. При выбросе 2 работника получили ожоги. Течь устранили за счет отключения насоса, сброса давления аргона и дренирования петли. Пожар ликвидировали через 50 мин при помощи глинозема.

16 февраля 1975 г. произошла значительная течь натрия на выходном трубопроводе аварийного испарителя ПГ-5 в районе тройника по 2-му контуру. Утечке предшествовала разгерметизация данного испарителя с возникновением реакции натрия с водой. Из-за ошибочных действий персонала отключение ПГ было неполным и вода продолжала поступать во 2-й контур. В результате взаимодействия натрия с водой при высокой температуре была прожжена стенка трубопровода. Истечение натрия и продуктов взаимодействия с водой сопровождалось возгоранием и было оперативно затушено глиноземом. В процессе реакции натрия с водой выделялся водород, который выходил из отверстия в трубопроводе и горел факелом, длина которого составляла около 20–30 см. Факельное горение продолжалось 2,5 ч. Для тушения данного пожара под струю вытекающего натрия и продуктов реакции устанавливались металлические ящики из-под глинозема, в которых было собрано 300 кг натрия.

С 1980 по 1991 г. на реакторе БН-600 Белоярской АЭС (СССР) было 27 течей натрия. Самая крупная из них произошла 31 декабря 1990 г. в дренажном трубопроводе диаметром 40 мм, при этой аварии вытекло порядка 600 кг натрия. После уборки продуктов горения и изоляции была обнаружена

трещина размером 30 мм, которая образовалась из-за дефекта штуцера и воздействующих эксплуатационных нагрузок.

В декабре 1982 г. в 1-м контуре реактора БН-600 на всасывающем патрубке насоса бакового хозяйства произошла утечка 1 кг натрия. Течь была обнаружена оперативно за счет дозиметрической сигнализации. В 1989 и 1990 г. на одном и том же участке трубопровода выхода натрия из фильтр-ловушки произошли незначительные утечки, которые были обнаружены при помощи дозиметрической сигнализации.

В декабре 1995 г. на АЭС Монжу (Япония) из-за дефекта сварных швов в трубах, перекачивающих натрий, произошла утечка 3 тонн теплоносителя на пол энергоблока, произошел крупный пожар, в результате которого температура в помещении повысилась до нескольких сотен градусов [24].

При анализе данных о пожарах натриевого теплоносителя на атомных электростанциях следует отметить, что ключевым фактором, который способствует уменьшению последствий утечки натриевого теплоносителя, является своевремен-

ность обнаружения, оперативное принятие управленческих решений, направленных на локализацию и ликвидацию горения с минимальной угрозой жизни и здоровью участников тушения.

### Выводы

Проанализировав радионуклиды, присутствующие в натриевом теплоносителе реактора на быстрых нейтронах, были определены наиболее опасные радиоактивные элементы для человека. Данные, полученные в ходе проведения системного анализа радионуклидов, будут использованы для последующих исследований в области радиационной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. По результатам анализа пожарной опасности радиоактивного натрия, применяемого в реакторах на быстрых нейтронах, были определены наиболее распространенные огнетушащие вещества, описаны особенности тушения пожаров, возникающих на ядерных энергетических установках с натриевым теплоносителем.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nuclear power reactors in the world. Vienna : International Atomic Energy Agency. 2022. 102 p.
2. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 666. Issue 2. P. 022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
3. Dhillon B.S. Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants. CRC Press, 2017. Pp. 62–88. DOI: 10.1201/b22260
4. Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 66–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75
5. Nayak A., Kulkarni P. Severe accidents in nuclear reactors. Woodhead Publishing, 2021. 394 p.
6. Kumar S. Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants. Academic Press, 2021. 260 p.
7. Petrangeli G. Nuclear safety. Butterworth-Heinemann, 2019. 586 p.
8. Рачков В.И., Арнольдов М.Н., Ефанов А.Д., Калякин С.Г., Козлов Ф.А., Логинов Н.И. и др. Использование жидких металлов в ядерной, термоядерной энергетике и других инновационных технологиях // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 20. DOI: 10.1134/S0040363614050087
9. Orlov Y.I., Efanov A.D., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Papovyanets A.K., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V. Hydrodynamic problems of heavy liquid metal coolants technology in loop-type and mono-block-type reactor installations // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237. Issue 15–17. Pp. 1829–1837. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.008
10. Асхадуллин Р.Ш., Мартынов П.Н., Рачков В.И., Легких А.Ю., Стороженко А.Н., Ульянов В.В., Гулевский В.А. Контроль и регулирование содержания кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях для противокоррозионной защиты сталей // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 595–604. DOI: 10.7868/S0040364416040013
11. Thomson J.R. High integrity systems and safety management in hazardous industries. Butterworth-Heinemann, 2021. 360 p.
12. Englander M., Stohr J.A. Chimie et industrie. 1956. Vol. 75. Issue 2. Pp. 53–60
13. Носов Ю.В., Ровнейко А.В., Ташилыков О.Л., Щеклеин С.Е. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН-350, -600 // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 4. С. 195–199.
14. Kozlov F.A., Alexeev V.V., Zagorul'ko Yu.I., et al. The summary of the sodium coolant technology development in application to LMFBRs // Working material TM on the Coordinated Project (CRP) Analyses and Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems (Obninsk, February 14–18, 2005). Vienna, IAEA, 2005. Pp. 237–259.
15. Сорокин А.П., Гулевич А.В., Клинов Д.А., Кузина Ю.А., Камаев А.А., Иванов А.П. и др. Исследования высокотемпературной ядерной энерго-

- технологии для производства водорода и других инновационных применений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2020. № 1. С. 102–119. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-102-119
16. Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Теплофизика щелочных жидких металлов. Часть 2: Физхимия, технология и инновационные приложения (ретроспективно-перспективный взгляд) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 233–251. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-233-251
  17. Сутягина Р.О., Алексеев В.В., Сутягин И.А. Обзор существующих систем очистки в области жидкометаллических теплоносителей Препринт ФЭИ – 3295. Обнинск, 2021. 53 с.
  18. Козлов Ф.А., Волчков Л.Г., Кузнецов Э.К., Матюхин В.В. Жидкометаллические теплоносители ЯЭУ. Очистка от примесей и их контроль / под ред. Ф.А. Козлова. М. : Энергоатомиздат, 1983.
  19. Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества. Л., 1990. С. 425–459.
  20. Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М. и др. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Ч. 1 / под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. Екатеринбург, 2013. 548 с.
  21. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М. : Энергоатомиздат, 1990. 432 с.
  22. Микеев А.К. Пожары на радиационно-опасных объектах. Факты, выводы, рекомендации. М. : ВНИИПО, 2000. 346 с.
  23. Соловьев С.П. Аварии и инциденты на атомных электростанциях / под общ. ред. С.П. Соловьева; учеб. пос. Обнинск : ИАТЭ, 1992. 300 с.
  24. Жаворонков И.С., Ильющонок А.В. Обеспечение пожарной безопасности атомных электростанций // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2. № 3. С. 343–350.

## REFERENCES

1. *Nuclear power reactors in the world*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2022; 102.
2. Barbin N.M., Titov S.A., Kobelev M. Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 666(2):022018. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018
3. Dhillon B.S. *Safety, reliability, human factors, and human error in nuclear power plants*. CRC Press, 2017; 62-88. DOI: 10.1201/b22260
4. Titov S.A., Barbin N.M., Kobelev A.M. The analysis of emergency situations related to fires at nuclear power plants. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):66-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.66-75 (rus).
5. Nayak A., Kulkarni P. *Severe accidents in nuclear reactors*. Woodhead Publishing, 2021; 394.
6. Kumar S. *Reliability and probabilistic safety assessment in multi-unit nuclear power plants*. Academic Press, 2021; 260.
7. Petrangeli G. *Nuclear safety*. Butterworth-Heinemann, 2019; 586.
8. Rachkov V.I., Arnoldov M.N., Efanov A.D., Kalyakin S.G., Kozlov F.A., Loginov N.I., et al. Use of liquid metals in nuclear, thermonuclear power engineering and other innovative technologies. *Teploenergetika*. 2014; 5:20. DOI: 10.1134/S0040363614050087
9. Orlov Y.I., Efanov A.D., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Papovyants A.K., Levchenko Yu.D., Ulyanov V.V. Hydrodynamic problems of heavy liquid metal coolants technology in loop-type and mono-block-type reactor installations. *Nuclear Engineering and Design*. 2007; 237(15-17):1829-1837. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.03.008
10. Askhadullin R.Sh., Martynov P.N., Rachkov V.I., Legkikh A.Yu., Storozhenko A.N., Ul'yanov V.V., Gulevskiy V.A. Monitoring and control of the oxygen content in heavy liquid-metal coolants for anticorrosion protection of steels. *Thermal Physics of High Temperatures*. 2016; 54(4):595-604. DOI: 10.7868/S0040364416040013
11. Thomson J.R. *High integrity systems and safety management in hazardous industries*. Butterworth-Heinemann, 2021; 360.
12. Englander M., Stohr J.A. *Chimie et industrie*. 1956; 75(2):53-60.
13. Nosov Yu.V., Rovneiko A.V., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Features of fast reactors decommissioning БН-350, -600. *Atomic Energy*. 2018; 125(4):195-199.
14. Kozlov F.A., Alexeev V.V., Zagorul'ko Yu.I., et al. The summary of the sodium coolant technology development in application to LMFRs. *Working material TM on the Coordinated Project (CRP) Analyses and Lessons Learned from the Operational Experience with Fast Reactor Equipment and Systems*. Obninsk, 14–18 February 2005. Vienna, IAEA, 2005; 237-259.
15. Sorokin A.P., Gulevich A.V., Klinov D.A., Kuzina Yu.A., Kamaev A.A., Ivanov A.P., et al. Studies of high-temperature nuclear energy technology for hydrogen production and other innovative applications. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear reactor constants*. 2020; 1:102-119. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-1-102-119
16. Kuzina Yu.A., Sorokin A.P. Thermal physics of alkaline liquid metals. Part 2: Physical chemistry, technology and innovative applications (retrospective-perspective view). *Questions of Atomic Science and Technology*.

- Series: Nuclear reactor constants.* 2019; 3:233-251. DOI: 10.55176/2414-1038-2019-3-233-251
17. Sutyagina R.O., Alekseev V.V., Sutyagin I.A. *Review of existing purification systems in the field of liquid metal coolants Preprint FEI-3295.* Obninsk, 2021; 53.
  18. Kozlov F.A., Volchikov L.G., Kuznetsov E.K., Matyukhin V.V. *Liquid-metal coolants of nuclear power plants. Purification from impurities and their control.* F. Kozlov (ed.). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983.
  19. Bazhenov V.A., Buldakov L.A., Vasilenko I.Ya. Harmful chemicals. *Radioactive Substances.* Leningrad, 1990; 425-459.
  20. Beltyukov A.I., Karpenko A.I., Poluektov S.A., Tashlykov O.L., Titov G.P., Tuchkov A.M., et al. *Nuclear power plants with sodium-cooled fast neutron reactors. Part I.* S.E. Shchekleina, O.L. Tashlykova (ed.). Ekaterinburg, 2013; 548.
  21. Mikeev A.K. *Fire protection of nuclear power plants.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990; 432.
  22. Mikeev A.K. *Fires at radiation-hazardous objects. Facts, conclusions, recommendations.* Moscow, VNIPO, 2000; 346.
  23. Solovyov S.P. *Accidents and incidents at nuclear power plants: textbook.* S.P. Solovyov (ed.). Obninsk, IATE, 1992; 300.
  24. Zhavoronkov I.S., Ilyushonok A.V. Ensuring fire safety of nuclear power plants. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus.* 2018; 2(3):343-350.

Поступила 17.02.2023, после доработки 06.03.2023;

принята к публикации 20.03.2023

Received February 17, 2023; Received in revised form March 6, 2023;

Accepted March 20, 2023

### Информация об авторах

**ПРЫТКОВ Любим Николаевич**, адъюнкт, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 1105831; ORCID: 0000-0002-8047-5174; e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

**БАРБИН Николай Михайлович**, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 31647; Scopus AuthorID: 6701448034; ResearcherID: AGQ-1655-2022; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**ТИТОВ Станислав Андреевич**, научный сотрудник Научно-исследовательского отделения Учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about the authors

**Lyubim N. PRYTKOV**, Adjunct, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; SPIN-Code: 8849-2525; ID RSCI: 1105831; ORCID: 0000-0002-8047-5174; e-mail: prytkov.l.n@mail.ru

**Nikolay M. BARBIN**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 31647; Scopus AuthorID: 6701448034; ResearcherID: AGQ-1655-2022; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

**Stanislav A. TITOV**, Researcher of Research Department of Educational and Scientific Complex of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 1064766; ORCID: 0000-0002-6903-575X; e-mail: tsa-nhl@mail.ru

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.