

УДК: 621.039.73

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.005

© 2023. Все права защищены.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ СУРЬМЫ В ТРАПНЫЕ ВОДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1200

Шаров Д. А.\* , канд. физ.-мат. наук (DASharov@vniiaes.ru), Семёновы А. С.\* (ASSemenovkykh@vniiaes.ru),  
 Иванов Е. А.\* , канд. техн. наук (EALvanov@vniiaes.ru), Аржаткин В. Г.\* (VGArzhatkin@vniiaes.ru),  
 Крутских Д. А.\* (DAKrutskikh@vniiaes.ru), Макарулин И. И.\* (IIMarakulin@vniiaes.ru),  
 Тяпков В. Ф.\* , канд. техн. наук (VFTiapkov@vniiaes.ru), Юдаков А. Ю.\* (YYudakov@vniiaes.ru),  
 Барабин А. В.\*\* (BarabinAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru), Гусев И. Н.\*\* (GusevIN@nvnpp1.rosenergoatom.ru),  
 Поваров В. П.\*\* , д-р техн. наук (PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru),  
 Росновский С. В.\*\* , канд. техн. наук (RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru),  
 Стацупа Д. Б.\*\* (StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru),  
 Щукин А. П.\*\* , канд. техн. наук (SchukinAP@nvnpp1.rosenergoatom.ru),  
 Курындин А. В.\*\*\* , канд. техн. наук (kuryndin@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 16 мая 2023 г.

### Аннотация

*В статье представлены основные результаты научно-исследовательской работы, посвященной определению источников поступления радионуклидов сурьмы в трапные воды при эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1200. Рассмотрены механизмы образования и поступления радиоизотопов сурьмы из первого контура реакторной установки ВВЭР-1200 в трапные воды за счет протечек. На основе результатов экспериментальных исследований содержания радиоизотопов сурьмы в трапных водах и в жидких средах систем реакторной установки ВВЭР-1200, камеральных и экспериментальных исследований содержания примесей стабильных сурьмы и олова в конструкционных материалах, моделирования образования и переноса радиоизотопов сурьмы в первом контуре реакторной установки ВВЭР-1200, с учетом международного опыта, выполнен анализ вероятных источников поступления сурьмы в теплоноситель первого контура.*

*Определены возможные пути решения проблемы, связанной с повышенным содержанием радиоизотопов сурьмы в жидких средах действующих и сооружаемых АЭС.*

**► Ключевые слова:** ВВЭР-1200, теплоноситель первого контура, трапные воды, жидкие радиоактивные отходы, специальная водоочистка, радиоизотоп, сурьма, олово, активация, отложения.

\* АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций», Москва, Россия.

\*\* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия.

\*\*\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## DETERMINATION OF SOURCES OF ANTIMONY RADIOISOTOPES ENTERING THE DRAIN WATER DUE TO OPERATION OF THE VVER-1200 REACTOR

Sharov D. A.\*, Ph. D.,  
Semenovykh A. S.\*,  
Ivanov E. A.\*, Ph. D.,  
Arzhatkin V. G.\*,  
Krutskikh D. A.\*,  
Marakulin I. I.\*,  
Tyapkov V. F.\*, Ph. D.,  
Yudakov A. Yu.\*,  
Barabin A. V.\*\*,  
Gusev I. N.\*\*,  
Povarov V. P.\*\*, Doctor of Engineering,  
Rosnovsky S. V.\*\*, Ph. D.,  
Statsura D. B.\*\*,  
Schukin A. P.\*\*, Ph. D.,  
Kuryndin A. V.\*\*\*, Ph. D.

Article is received on May 16, 2023.

### *Abstract*

*The article presents the main results of the research work devoted to determination of sources of antimony radionuclides entering the drain water due to operation of the VVER-1200 reactor. The mechanisms of generation and entry of antimony radioisotopes from the primary circuit of the VVER-1200 reactor into drain waters due to leaks were reviewed. An analysis was made for probable sources of antimony entry into the primary coolant based on the results of experimental studies of the content of antimony radioisotopes in drain waters and in liquid media of systems of the VVER-1200 reactor, desktop and experimental studies of the content of stable antimony and tin impurities in structural materials, and modeling of the generation and transfer of antimony radioisotopes in the primary circuit of the VVER-1200 reactor, taking into account the international experience.*

*Possible ways for solving the problem of the increased content of antimony radioisotopes in liquid media of nuclear power plants in operation and under construction were determined.*

► **Keywords:** VVER-1200, primary coolant, drain water, liquid radioactive waste, liquid treatment systems, radioisotope, antimony, tin, activation, deposits.

\* JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation”, Moscow, Russia.

\*\* Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Russia.

\*\*\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

### Введение

Обращение с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) – важная составляющая безопасной и экономически эффективной эксплуатации энергоблоков АЭС. Проблеме обращения с ЖРО на АЭС уделяется пристальное внимание специалистов атомной отрасли, ведутся работы по поиску оптимальных технологий переработки и кондиционирования ЖРО. При этом зачастую забывают или уделяют незаслуженно мало внимания важнейшему аспекту: влиянию характеристик ЖРО и в первую очередь радионуклидного состава на выбор способов переработки [1]. Именно радионуклидный состав ЖРО во многом и должен определять такой выбор. Учитывать только три радионуклида  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , как это обычно практикуется, без проведения полноценных радиологических исследований представляется некорректным.

Примером, к чему приводит игнорирование этого аспекта, является ситуация с сурьмой, сложившаяся на энергоблоках ВВЭР-1200 Нововоронежской АЭС-2 (НВАЭС-2). После ввода в эксплуатацию энергоблока № 1 НВАЭС-2 выявлено, что проектная система специальной водочистки (СВО) в должной мере не обеспечивает очистку образующихся трапных вод [2].

Для переработки трапных вод, образующихся в процессе работы энергоблока № 1 НВАЭС-2, в соответствии с проектом, вместо классической технологии на основе выпарных аппаратов (ВА) применена технология, основанная на ионоselectивной очистке растворов от радионуклидов, реализованная в виде установки переработки трапных вод (УПТВ). В результате переработки на УПТВ предусмотрено образование радиоактивного шлама (содержащего сорбент и механические взвеси),

чистого конденсата и нерадиоактивных сухих солей. В рамках опытно-промышленной эксплуатации обнаружено, что УПТВ не способна очистить воду от радиоизотопов сурьмы  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$ , присутствие которых в трапной воде не предусмотрено при проектировании. В результате после УПТВ образуются сухие соли, относящиеся к радиоактивным отходам, что не соответствует проекту [2]. Проектная схема переработки трапных вод приведена на рис. 1.

Для решения возникшей проблемы разработан и выполнен комплекс мероприятий. В первую очередь реализована альтернативная схема переработки трапных вод: на ВА системы переработки теплоносителя КВФ с последующим цементированием образованного солевого концентрата (кубового остатка). На следующем этапе инициировано проведение двух научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по поиску источников сурьмы и сорбентов для очистки от сурьмы.

В настоящей статье представлены результаты НИОКР по определению источников поступления радионуклидов сурьмы в трапные воды при эксплуатации реакторной установки (РУ) ВВЭР-1200, выполненной АО «ВНИИАЭС» по заказу филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция». Целью НИОКР являлось определение источников и процессов поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды при эксплуатации энергоблока № 1 НВАЭС-2 и разработка технических предложений по снижению поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды. Работы в рамках НИОКР включали в себя:

- 1) определение механизмов образования и поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды;
- 2) анализ опыта решения «проблемы радиоизотопов сурьмы» на зарубежных АЭС;

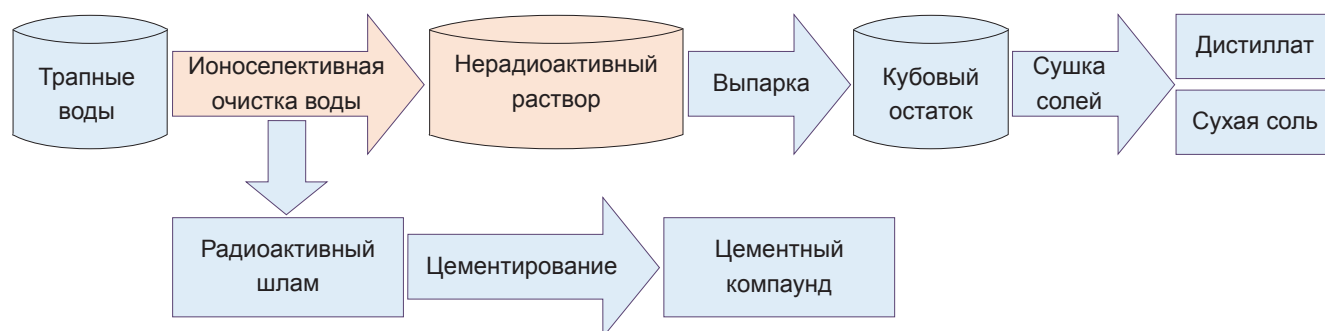


Рис. 1. Проектная схема переработки трапных вод на энергоблоке № 1 НВАЭС-2  
 [Fig. 1. Design scheme for the processing of drain water at Novovoronezh 2-1]



3) экспериментальные исследования содержания радиоизотопов сурьмы в жидких средах систем РУ ВВЭР-1200;

4) экспериментальные исследования содержания радиоизотопов сурьмы в трапных водах;

5) камеральное и экспериментальное исследование содержания примесей сурьмы и олова в конструкционных материалах;

6) моделирование образования и переноса радиоизотопов сурьмы в первом контуре РУ ВВЭР-1200;

7) анализ вероятных источников поступления сурьмы в теплоноситель первого контура (ТПК) РУ ВВЭР-1200 с определением возможных путей решения «проблемы радиоизотопов сурьмы» и разработкой рекомендаций по дальнейшим мероприятиям.

Необходимо отметить, что в настоящей статье рассмотрены только вопросы, связанные с радиоизотопами сурьмы, и не рассматриваются остальные проблемы обращения с трапными водами на АЭС, в том числе связанные с недостатками проектирования.

Далее кратко представлены основные результаты указанных исследований. Более подробно различные направления исследований будут рассмотрены в отдельных статьях.

### 1. Механизмы образования и поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды

При эксплуатации АЭС образуются три основных радиоизотопа сурьмы:  $^{122}\text{Sb}$  ( $T_{1/2}=2,7$  сут.),  $^{124}\text{Sb}$  ( $T_{1/2}=60,2$  сут.) и  $^{125}\text{Sb}$  ( $T_{1/2}=2,77$  лет).

Проведенный анализ показал, что основным механизмом образования в ТПК радиоизотопов  $^{122}\text{Sb}$  и  $^{124}\text{Sb}$  является радиационный захват нейтронов на стабильных изотопах сурьмы  $^{121}\text{Sb}$  и  $^{123}\text{Sb}$  с изотопной распространенностью 57,21 и 42,79 %, соответственно.

Основным механизмом образования  $^{125}\text{Sb}$  является радиационный захват нейтронов  $^{124}\text{Sn}$  (изотопная распространенность – 5,79 %) с образованием радиоизотопа олова  $^{125}\text{Sn}$ , который распадается с периодом полураспада 9,64 сут. в  $^{125}\text{Sb}$ . Кроме того, вклад в поступление  $^{125}\text{Sb}$  в ТПК может давать процесс деления ядерного топлива. Свойства и механизмы образования радиоизотопов сурьмы приведены в таблице № 1 [3–5].

Поступление стабильных изотопов сурьмы и олова в ТПК возможно в результате:

1) коррозионно-эрозионных процессов из конструкционных материалов первого контура, включая материалы оборудования, трубопроводов, сварочных швов, арматуры, датчиков контрольно-измерительных приборов (КИП), контактирующих с ТПК;

2) вымывания из материалов уплотнений насосного оборудования систем, связанных с ТПК;

3) введения в ТПК реагентов, используемых для ведения водно-химического режима (ВХР).

Из ТПК радионуклиды с организованными и неорганизованными протечками и течами при выполнении работ на вскрытом оборудовании первого контура, при взрывлении и регенерации ионообменных смол СВО поступают в трапные воды. Схема образования и поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды представлена на рис. 2.

Таблица № 1

### Свойства и механизмы образования радиоизотопов сурьмы Properties and mechanisms of generation of antimony radioisotopes

Изотоп Sb	Характеристики радиоактивности		Основной механизм образования	Сечение реакции на тепловых нейтронах, барн	Резонансный интеграл, барн	Материнский изотоп (изотопная распространенность, %)
	Период полураспада	Вид				
$^{122}\text{Sb}$	2,7 сут.	$\beta^-$ , $\gamma$	$^{121}\text{Sb}(n,\gamma)^{122}\text{Sb}$	5,77	206	$^{121}\text{Sb}$ (57,21)
$^{124}\text{Sb}$	60,2 сут.	$\beta^-$ , $\gamma$	$^{123}\text{Sb}(n,\gamma)^{124}\text{Sb}$	3,87	128	$^{123}\text{Sb}$ (42,79)
$^{125}\text{Sb}$	2,77 года	$\beta^-$ , $\gamma$	$^{124}\text{Sn}(n,\gamma)^{125}\text{Sn}$ $^{125}\text{Sn} \rightarrow ^{125}\text{Sb} + e^- + \bar{\nu}$ ( $T_{1/2}=9,64$ сут.)	0,13	8	$^{124}\text{Sn}$ (5,79)

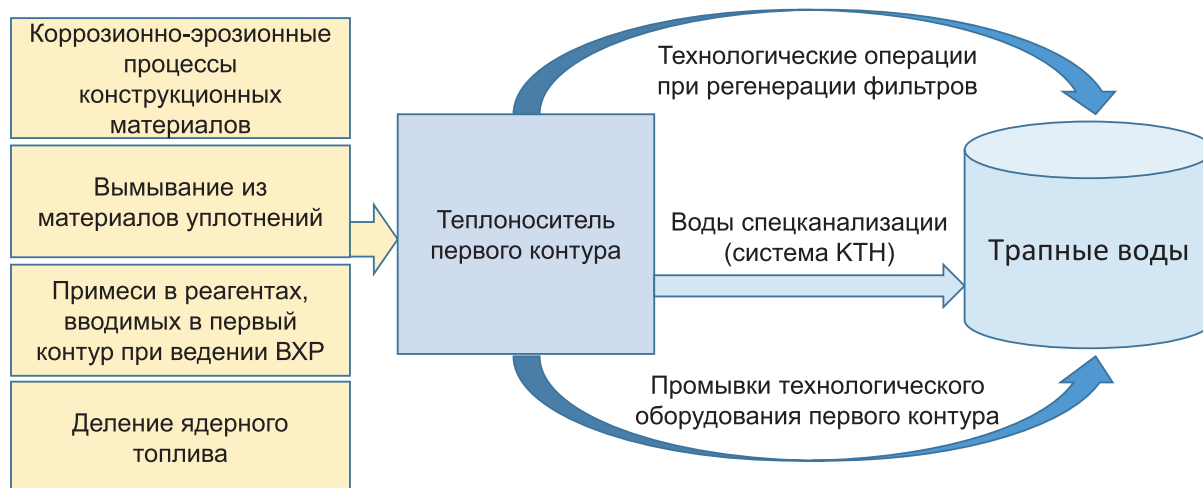


Рис. 2. Схема образования и поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды  
 [Fig. 2. Scheme of the generation and entry of antimony radioisotopes into the drain water]

## 2. Опыт решения «проблемы радиоизотопов сурьмы» на зарубежных АЭС

Анализ опыта эксплуатации зарубежных АЭС показал, что проблема с сурьмой не является специфичной исключительно для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1200 на НВАЭС-2 и ранее неоднократно возникала на зарубежных АЭС [6]. Однако в преобладающем большинстве случаев проблема была связана с ухудшением радиационной обстановки на АЭС в результате накопления радиоизотопов сурьмы на внутренних поверхностях трубопроводов первого контура, что не наблюдается на НВАЭС-2. Единственным исключением является АЭС «Ханбит» (Южная Корея), где, аналогично НВАЭС-2, выявлены сложности с очисткой жидких радиоактивных сред от радиоизотопов сурьмы, так же не учтенных при проектировании после отказа от ВА в пользу ионообменной технологии [7].

Основными источниками поступления сурьмы в теплоноситель РУ, согласно международному опыту, являются пусковые источники нейтронов (Sb-Be), уплотнения и подшипники насосов, а также различные конструкционные и другие материалы, контактирующие с ТПК. В таблице № 2 приведена сводная информация по выявленным на зарубежных АЭС источникам сурьмы и мероприятиям по их устранению. В связи с тем, что наличие сурьмы способствует повышению твердости и механической прочности, отдельные поставщики широко ее применяли в составе конструкционных материалов главного циркуляционного насоса (ГЦН) и насосов вспомогательных систем. По имеющимся данным, проблема с содержанием сурьмы в конструкционных материалах не характерна для ГЦН советского и российского производства.

Важно отметить, что за счет реализации мероприятий по выявлению и исключению локальных высокоинтенсивных источников сурьмы удельные активности изотопов сурьмы в ТПК зарубежных АЭС радикально снижались (на несколько порядков) до значений, фактически наблюдаемых в ТПК энергоблока № 1 НВАЭС-2.

## 3. Экспериментальное исследование содержания радиоизотопов сурьмы в жидких средах систем реакторной установки ВВЭР-1200

Анализ результатов радиационного контроля ТПК в ходе первых четырех топливных кампаний энергоблока № 1 НВАЭС-2 с 2017 по 2022 гг. показал, что радиоизотопы сурьмы в пробах ТПК во время работы РУ на мощности при стационарных условиях в основном не обнаруживались, а в переходных режимах обнаруживались эпизодически. В рамках НИОКР после изменения методики измерений было установлено, что при стационарных условиях работы РУ на мощности удельные активности изотопов сурьмы в ТПК находятся в диапазоне (150÷2 500) Бк/кг и в среднем составляют примерно 2 000, 300 и 200 Бк/кг для <sup>122</sup>Sb, <sup>124</sup>Sb и <sup>125</sup>Sb, соответственно.

Как показал анализ, при разгрузках, остановках или пуске РУ энергоблоков НВАЭС-2 наблюдается резкий рост удельных активностей изотопов сурьмы в ТПК, что характерно также для других АЭС. Удельные активности возрастают на два – три порядка до (10<sup>4</sup>÷10<sup>6</sup>) Бк/кг. Наблюдаемый примерно одинаковый рост удельных активностей изотопов сурьмы при нестационарных условиях работы РУ в различные топливные кампании свидетельствует о том, что поступление стабильных изотопов олова

Таблица № 2

**Сводная информация по выявленным на зарубежных АЭС источникам поступления сурьмы**  
**Summary information on the sources of antimony released at NPPs operated abroad**

Страна	Суть проблемы	Выявленные источники сурьмы	Мероприятия по устранению
Германия («Библис», «Филиппсбург», «Неккарвестхайм») [8, 9]	Ухудшение радиационной обстановки	ГЦН и другие насосы	Замена оборудования на аналоги без сурьмы
Испания («Альмарас») [10]		Пусковой источник нейтронов (Sb-Be)	Удаление поврежденного пускового источника нейтронов
Канада («Джентилли») [11]		ГЦН (уплотнения и подшипники)	Деактивация контура
Китай («Циньшань») [12]		Пусковой источник нейтронов (Sb-Be)	Нет информации
Финляндия («Ловииса») [13, 14]		ГЦН, реагенты ВХР	Замена оборудования на аналоги без сурьмы, контроль сурьмы в реагентах
Франция («Сан-Лоран» и др.) [15, 16]		Насосы вспомогательных систем, пусковые источники нейтронов (Sb-Be)	Замена оборудования на аналоги без сурьмы
Швеция («Рингхалс») [17]		Конструкционные материалы	В разработке
Южная Корея («Ханбит») [7]	Присутствие радиоизотопов сурьмы в сбросе	ГЦН, конструкционные материалы	Замена уплотнений ГЦН на аналоги без сурьмы, мембранная фильтрация

и сурьмы в ТПК энергоблока № 1 НВАЭС-2 с начала его эксплуатации происходит непрерывно и примерно с одинаковой скоростью.

На основе собранного массива информации проведен анализ динамики удельной активности изотопов сурьмы, и определены механизмы ее резкого роста в переходных режимах. Выявлено, что такой рост происходит в два этапа:

1) после прекращения дозирования аммиака в первый контур за сутки до начала расхолаживания РУ (проектный режим), когда изменяются окислительно-восстановительные условия в ТПК;

2) во время снижения тепловой мощности РУ с вводом в ТПК борной кислоты для создания его стояночной концентрации (при этом происходит переход водородного показателя рН ТПК из щелочной области в кислую, что приводит к частичному растворению отложений на поверхностях тепловыделяющих сборок (ТВС), оборудования и трубопроводов первого контура).

Указанные наблюдения подтверждают и независимые результаты исследований динамики удельных активностей изотопов сурьмы в ТПК на зарубежных АЭС [18].

На рис. 3 представлена динамика удельной активности  $^{124}\text{Sb}$  в ТПК энергоблока № 2 НВАЭС-2 с наложением информации о мощности РУ, концентрации борной кислоты в ТПК, температуры ТПК, расхода теплоносителя на СВО. Также на рис. 3 обозначены моменты отключения ГЦН, и для сопоставления приведена информация по удельной активности  $^{54}\text{Mn}$ .

Анализ показал, что ведение ВХР первого контура при работе энергоблоков НВАЭС-2 с РУ ВВЭР-1200 на мощности осуществлялось в соответствии с установленными требованиями и не могло привести к поступлению повышенных количеств сурьмы в первый контур.

На основе анализа экспериментальных данных получена оценка эффективности фильтрации радиоизотопов сурьмы штатной системой низкотемпературной очистки ТПК (КВЕ) – от 37 до 76 %, что значительно ниже эффективности очистки других радионуклидов коррозионного происхождения (в среднем 95 %). Несмотря на относительно низкую эффективность очистки, по состоянию на конец отдельной топливной кампании РУ ВВЭР-1200, на фильтрах системы КВЕ накапливается значи-

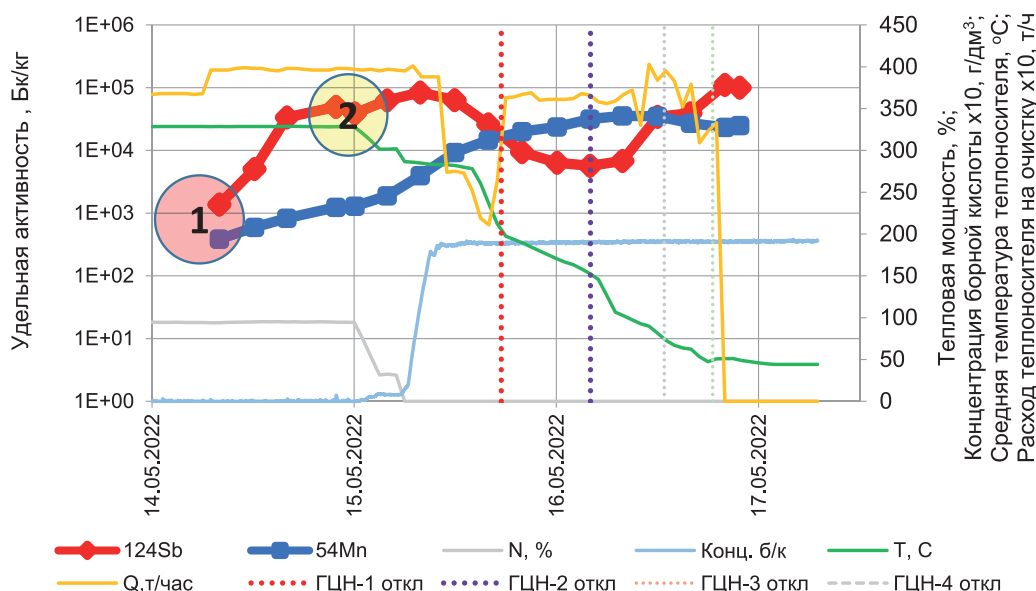


Рис. 3. Динамика удельной активности  $^{124}\text{Sb}$  в теплоноситель первого контура энергоблока № 2 НВАЭС-2. Этапы 1 и 2 роста удельной активности  $^{124}\text{Sb}$  обозначены соответствующими цифрами [Fig. 3. Dynamics of the specific activity of  $^{124}\text{Sb}$  in the primary coolant of Novovoronezh 2-2. Stages 1 and 2 of the increase in the specific activity of  $^{124}\text{Sb}$  are indicated by the corresponding numbers]

тельная активность каждого из изотопов сурьмы (~  $1,0 \cdot 10^{10}$  Бк), что в результате приводит к периодическому кратковременному росту удельной активности радиоизотопов сурьмы в трапных водах при взрыхлении фильтров указанной системы.

Наблюдаемые значения удельной активности изотопов сурьмы в ТПК энергоблоков НВАЭС-2 характерны и для других российских АЭС с РУ ВВЭР, а также зарубежных АЭС, где проблематика сурьмы не принималась во внимание в силу своей незначительности (например, энергоблок № 5 АЭС «Козлодуй» [19]).

Отсюда можно заключить, что поступление стабильных изотопов сурьмы и олова в ТПК при работе РУ энергоблоков НВАЭС-2 не является аномальным и свидетельствует об отсутствии высокоинтенсивных источников сурьмы, как это имело место на отдельных зарубежных АЭС.

#### 4. Экспериментальное исследование содержания радиоизотопов сурьмы в трапных водах

Анализ собранного массива данных по результатам радиационного контроля трапной воды, образующейся при эксплуатации энергоблоков НВАЭС-2, показал, что:

- удельные активности  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  в трапной воде варьируются в широком диапазоне до  $3,6 \cdot 10^4$  Бк/кг при среднем значении примерно  $3,0 \cdot 10^3$  Бк/кг, медианном –  $1,0 \cdot 10^3$  Бк/кг;

- радиоизотопы сурьмы  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  формируют основной вклад (в среднем около 51 %) в удельную активность гамма-излучающих радионуклидов в трапной воде.

Радиоизотоп  $^{122}\text{Sb}$  обнаруживается в незначительной части проб и значимого вклада в удельную активность трапных вод не дает, что обусловлено его малым периодом полураспада ( $T_{1/2}=2,7$  сут.) относительно времени формирования трапных вод.

На рис. 4 представлена динамика удельных активностей  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  в трапной воде баков 1КРФ13ВВ-1 и 1КРФ13ВВ-2 энергоблока № 1 НВАЭС-2. Видно, что в трапных баках в отдельные моменты времени наблюдается резкий рост удельной активности изотопов сурьмы на один-два порядка величины.

Анализ имеющейся информации и результатов контроля различных сред показал, что наблюдаемые в баках трапных вод энергоблока № 1 НВАЭС-2 удельные активности изотопов сурьмы обусловлены поступлением  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  из фильтров системы очистки ТПК (с жидкими средами после регенерации и взрыхления) и при отмывке оборудования первого контура и ВА.

#### 5. Камеральные и экспериментальные исследования содержания примесей сурьмы и олова в конструкционных материалах

Для идентификации источников поступления стабильной сурьмы и олова в ТПК проведены

камеральные и экспериментальные исследования содержания примесей сурьмы и олова в конструкционных материалах.

В результате анализа заводской документации на оборудование, сопроводительной поставочной документации на трубопроводы, сертификатов на материалы, примененные при изготовлении оборудования, а также документов по стандартизации (ГОСТ [20]) установлено, что:

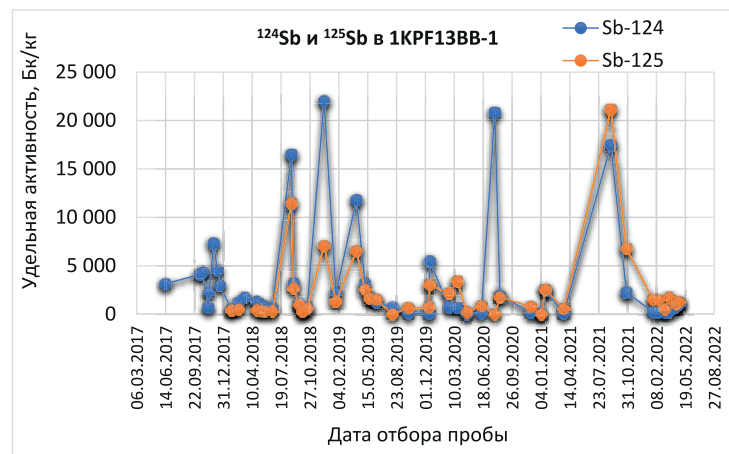
- содержание сурьмы и олова не регламентировано ГОСТ [20] для подавляющего большинства сталей, примененных в качестве конструкционных материалов;
- полноценной достоверной информации по содержанию сурьмы в сертификатах не содержится.

В рамках НИОКР проведено экспериментальное исследование систем, контактирующих с ТПК и рассматриваемых как потенциальные источники сурьмы и олова. Персоналом НВАЭС-2 было отобрано и предоставлено для исследований восемь представительных образцов материалов главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), главного

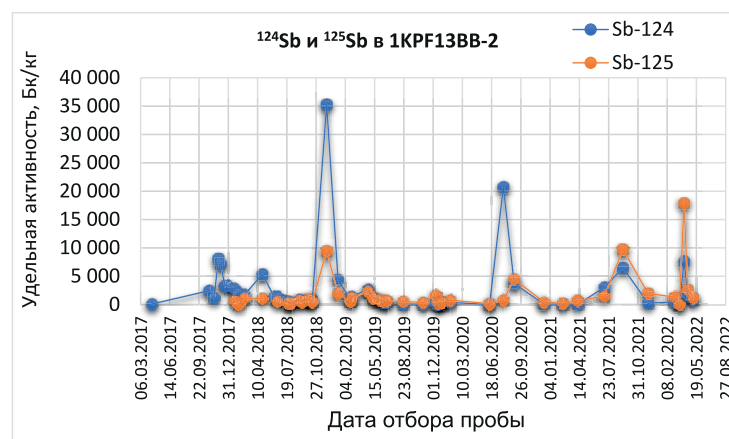
циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА), оболочки твэл, импульсных трубопроводов КИП. Исследование химического состава отобранных образцов выполнено в материаловедческой лаборатории АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» с применением эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Optima 8000. Нижний предел измерения применяемой методики измерений составлял  $5 \cdot 10^{-5}$  % масс. Перечень исследованных образцов и результаты измерений приведены в таблице № 3.

В результате исследований примеси сурьмы обнаружены во всех образцах с содержанием в диапазоне значений ( $10^{-4} \div 10^{-2}$ ) % масс. Примеси олова обнаружены практически во всех исследованных образцах с содержанием в диапазоне значений ( $5 \cdot 10^{-5} \div 10^{-3}$ ) % масс.

Полученные результаты свидетельствуют, что примеси сурьмы и олова присутствуют во всех конструкционных материалах, контактирующих с ТПК. При этом каких-либо аномально высоких их содержаний (как в отдельных случаях на зарубежных АЭС) не обнаружено.



а)



б)

Рис. 4. Динамика удельной активности  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  в трапной воде баков 1KPF13BB-1 (а) и 1KPF13BB-2 (б) энергоблока № 1 НВАЭС-2 [Fig. 4. Dynamics of the specific activity of  $^{124}\text{Sb}$  and  $^{125}\text{Sb}$  in the drain water of tanks 1KPF13BB-1 (a) and 1KPF13BB-2 (b) of Novovoronezh 2-1]



**Перечень исследованных образцов и результаты измерений**  
**List of studied samples and measurement results**

№ п/п	Образец	Материал	Содержание примеси, % масс.	
			Сурьма	Олово
1.	Ушко втулки блока уплотнения ГЦНА	14X17H2	$(2,9 \div 3,0) \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
2.	Крепежный болт от нижнего радиального подшипника ГЦНА	12X18H10T	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3.	Шестигранный болт от накладки радиально-осевого подшипника ГЦНА	12X18H10T	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$(1,8 \div 2,0) \cdot 10^{-4}$
4.	Болт узла крепления конуса ГЦНА к корпусу сферическому	07X16H4Б	$(1,3 \div 1,4) \cdot 10^{-2}$	< НПИ*
5.	Темплет основного металла, вырезанный из образцов контрольных сварных соединений, использованных при аттестации сварки ГЦТ	15X2НМФА-А	$(2,7 \div 8,4) \cdot 10^{-4}$	$(4,0 \div 4,2) \cdot 10^{-4}$
6.	Темплет сварочного шва, вырезанный из образцов контрольных сварных соединений, использованных при аттестации сварки ГЦТ	15X2НМФА-А	$(0,22 \div 2,4) \cdot 10^{-3}$	$\leq 2,4 \cdot 10^{-4}$
7.	Материал оболочки твэла	Св-07Х25Н13	$(2,0 \div 3,5) \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
8.	Образец трубы для импульсных трубопроводов КИП	Э110	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$

\*НПИ – нижний порог измерения.

**6. Моделирование образования и переноса радиоизотопов сурьмы в первом контуре реакторной установки ВВЭР-1200**

Для анализа и интерпретации полученных экспериментальных данных разработана камерная модель, описывающая процессы образования, массопереноса и накопления радиоизотопов сурьмы в первом контуре (схема модели приведена на рис. 5). Разработанная модель учитывает:

- массоперенос стабильных элементов, являющихся материнскими для радиоизотопов сурьмы и олова (выход из конструкционных материалов, смыв, осаждение на поверхностях, перенос теплоносителем, очистка на СВО);
- образование радиоизотопов сурьмы и олова при активации примесей ТПК, в отложениях на поверхностях активной зоны РУ и в конструкционных материалах;
- массоперенос радиоизотопов сурьмы;
- радиоактивный распад.

На рис. 6 приведены результаты расчета накопления радиоизотопов сурьмы в ТПК в течение пяти топливных кампаний энергоблока № 1 НВАЭС-2 в сравнении с результатами измерения удельной активности изотопов сурьмы в ТПК при работе на стационарном уровне мощности, полученными в рамках НИОКР для пятой кампании. Видно, что

значения удельных активностей  $^{122}\text{Sb}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  в ТПК РУ ВВЭР-1200, рассчитанных по разработанной модели, с учетом полученных в рамках НИОКР экспериментальных значений содержания сурьмы и олова в конструкционных материалах, в целом удовлетворительно согласуются с соответствующими результатами измерений при стационарных условиях работы энергоблока № 1 НВАЭС-2.

В результате применения модели установлено, что наблюдаемые в ТПК удельные активности радиоизотопов сурьмы обусловлены поступлением стабильной сурьмы и олова из обладающих наибольшей площадью поверхности контакта с ТПК конструкционных материалов парогенератора (сплав 08X18H10T) и ТВС (сплавы Э635 и Э110).

**7. Вероятные источники поступления сурьмы в теплоноситель первого контура реакторной установки ВВЭР-1200**

Сурьма может поступать в ТПК как в виде стабильных изотопов с последующей активацией, так и в виде радиоактивных изотопов.

Как было указано в разделе 1 настоящей статьи, поступление стабильных изотопов сурьмы и олова в ТПК возможно в результате различных коррозионно-эрозионных процессов из конструкционных материалов первого контура за счет вымывания

из материалов уплотнений насосного оборудования связанных с ТПК систем, а также при введении в ТПК реагентов, используемых при ведении ВХР.

В результате выполненного комплекса исследований установлено:

- материалы уплотнений насосов, а также реагенты, применяемые при ведении ВХР, существенного вклада в поступление сурьмы в ТПК не дают;
- вклад поступления радиоизотопов сурьмы за счет деления ядерного топлива незначителен;
- определяющим источником поступления стабильных изотопов сурьмы и олова в ТПК энерго-

блока № 1 НВАЭС-2 являются конструкционные материалы главного циркуляционного контура.

Поступление стабильных примесей сурьмы и олова происходит со всей поверхности главного циркуляционного контура, при этом:

- основным (~ 94 %) источником поступления стабильной сурьмы в ТПК является конструкционный материал трубчатки парогенератора (сплав 08X18H10T);
- стабильное олово в ТПК в основном поступает из используемых в конструкции ТВС сплавов Э635 (~ 72 %) и Э110 (~ 21 %).

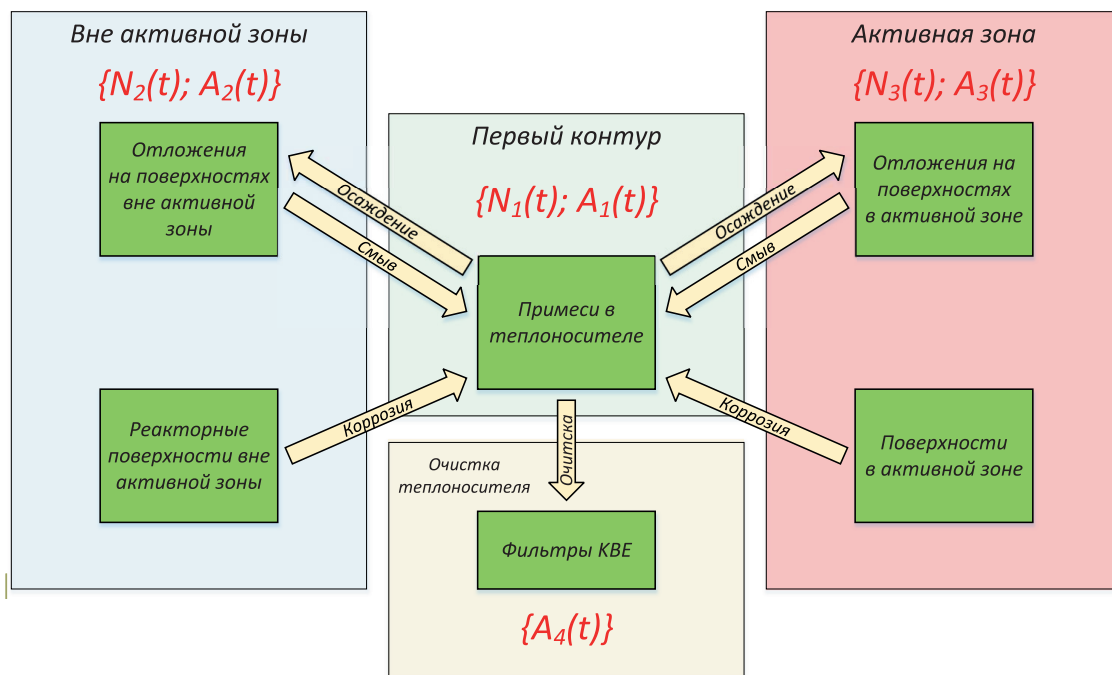


Рис. 5. Схема модели массопереноса продуктов коррозии в теплоноситель первого контура [Fig. 5. Scheme of the model of mass transfer of corrosion products in primary coolant]

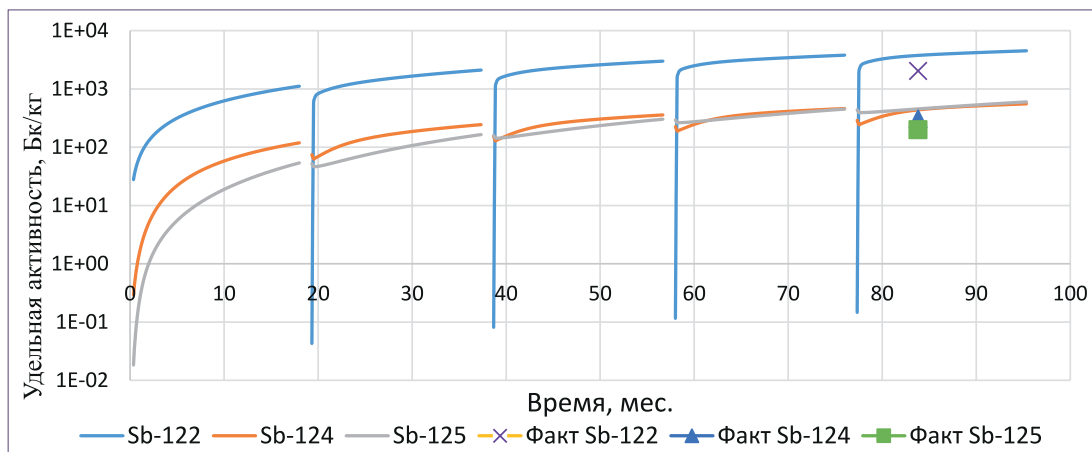


Рис. 6. Результаты расчета накопления радиоизотопов сурьмы в теплоноситель первого контура в течение пяти топливных кампаний энергоблока № 1 НВАЭС-2 в сравнении с экспериментальными данными [Fig. 6. The results of the calculation of the accumulation of antimony radioisotopes in the primary coolant during five fuel campaigns of Novovoronezh 2-1 in comparison with experimental data]

Доминирование парогенератора и ТВС как источников поступления стабильных изотопов сурьмы и олова в ТПК обусловлено двумя факторами:

- наличием примесей сурьмы и олова;
- значительными площадями контакта с ТПК.

### Основные выводы

Содержание радиоизотопов сурьмы в ТПК энергоблока № 1 НВАЭС-2 в целом сравнимо или меньше значений, характерных для других энергоблоков с реакторами ВВЭР и PWR в России и за рубежом.

Радиоизотопы  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{125}\text{Sb}$  формируют примерно 51 % суммарной удельной активности гамма-излучающих радионуклидов в трапной воде. При этом в трапных баках энергоблока № 1 НВАЭС-2 в отдельные моменты времени регистрируется резкий рост удельной активности изотопов сурьмы на один-два порядка величины. Максимальные удельные активности изотопов сурьмы, зарегистрированные в баках трапных вод энергоблока № 1 НВАЭС-2, обусловлены поступлением радиоизотопов сурьмы с жидкими средами после регенерации

и взрыхления фильтров систем очистки ТПК после отмывки оборудования первого контура, контактирующего с ТПК, и ВА.

Радиоизотопы сурьмы образуются в результате процессов активации стабильных изотопов сурьмы и олова. Примеси сурьмы и олова присутствуют во всех конструкционных материалах, причем в основном в следовых количествах. Полностью избавиться от них не представляется возможным.

Основным источником поступления стабильных изотопов сурьмы в ТПК на энергоблоке № 1 НВАЭС-2 являются конструкционные материалы трубчатки парогенератора. Основной источник поступления стабильных изотопов олова в ТПК – материалы ТВС.

На основе проведенного анализа и изучения опыта эксплуатации зарубежных АЭС можно сделать заключение, что главным направлением решения проблемы, связанной с повышенным содержанием радиоизотопов сурьмы в жидких средах действующих и сооружаемых АЭС, является изменение технологии обращения с трапными водами, а для проектируемых – нормирование содержания активируемых изотопов в конструкционных материалах.

### Литература

1. Кочетков О. А., Иванов Е. А., Шаров Д. А. Радиологические аспекты обращения с жидкими радиоактивными отходами атомных станций // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. Том 62. № 6. С. 34–38. DOI: 10.12737/article\_5a2534e207ddc6.86154973.
2. Поваров В. П., Гусев И. Н., Росновский С. В., Стацура Д. Б., Казанский В. Р., Гончаров Е. В. и др. Опыт внедрения систем ионоселективной очистки трапных вод от радионуклидов на блоках 1–2 НВАЭС-2 // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 64–70. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-64-70.
3. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов: постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069.
4. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory. База NNDC BNL. URL: <https://www.nndc.bnl.gov> (дата обращения: 08.06.2023).
5. Российская библиотека Файлов Оцененных Нейтронных Данных (РОСФОНД-2010). URL: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (дата обращения: 08.06.2023).
6. NEA/CRPPH/R(2014)2. Radiation Protection Aspects of Primary Water Chemistry and Source-term Management. Report, April, 2014.
7. Ok Sung Lee. (2016). Nuclear power plants generate radioactive waste within the liquid antimony (Sb) and removal study. Dissertation. Chosun University.
8. IAEA-NSNI/OSART/07/142F. Report of the operational safety review team (OSART) mission to the Neckarwestheim Nuclear Power Plant. Germany. 8 to 24 October 2007 and follow-up visit 11 to 14 May 2009.
9. Stöckert H., Emmert H. and Meyer Ch. zu Schwabedissen. (1987). VGB-Kraftwerkstechnik, 67 (3), 288 p.
10. Sustacha Duo D., Leal A. (2004). Reduction of the collective doses in Almaraz Nuclear Power Plant through source term reduction and the workload reduction. 2004 ISOE International ALARA Symposium, Lyon (France), 24–26 March.

11. Dundar Y., Odar S., Streit K., Allsop H., Guzonas D. (1996). Application of KWU antimony removal process at Gentilly-2. International conference on water chemistry of nuclear reactor systems. Bournemouth (United Kingdom), 13–17 October.

12. Fu Pengtao, Dai Mingliang, Zhu Zhaowen, et al. Study of annual tritium discharge in pressurized water reactor based on historical data. *High Power Laser and Particle Beams*, 9022, 34:026009.

13. Karl-Heinz Neeb. (1997). *The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors*. Walter De Gruyter, 725 p.

14. Jaervimaeki S., Kvarnstrom R., Maekinen M., Maekelae K. (2014). Actions taken to significantly reduce activity levels on primary loop surfaces at Loviisa NPP. Proceedings of nuclear plant chemistry conference 2014, Sapporo (NPC 2014).

15. Berger M., Bretelle J. L., Rocher A. (2002). Impact of main radiological pollutants on contamination risks (ALARA) optimisation of physico-chemical environment and retention techniques during operation and shutdown. Third ISOE European Workshop. Portoroz, Slovenia, 17–19 April.

16. Gaudard G., Gilles B., Mesnage F., Cattant F. (2002). Improvements of primary coolant shutdown chemistry and reactor coolant system cleanup. Chemistry 2002: International conference on water chemistry in nuclear reactors systems – operation optimisation and new developments. Avignon (France), 22–26 April.

17. Johansson M. (2016). Ringhals – Operational Experience on Silver and Antimony related to doses. ISOE International Symposium. Brussels, 1–3 June.

18. Radiochemistry control of the fuel during reactor operation and shut-down reactor on “Kozloduy” NPP, unit 5 and 6. WANO Workshop on Fuel Integrity Monitoring. Temelin NPP, Czech Republic, 10–12 November, 2009.

19. Dobrevski I. (2011). WWER-1000 Coolant Chemistry Improvement by Extended Fuel Cycles. Additional information. IAEA-TECDOC-1666 companion CD.

20. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: Стандартинформ, 2015. 112 с.

## References

1. Kochetkov O. A., Ivanov E. A., Sharov D. A. (2017). Radiologicheskie aspekty obrashcheniya s zhidkimi radioaktivnymi otkhodami atomnykh stantsii [Radiological aspects of liquid radioactive waste management from nuclear power plants operation]. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Medical radiology and radiation safety, vol. 62, No. 6, pp. 34–38. [in Russian]. DOI: 10.12737/article\_5a2534e207ddc6.86154973.

2. Povarov V. P., Gusev I. N., Rosnovskii S. V., Statsura D. B., Kazanskii V. R., Goncharov E. V., et al. (2020). Opyt vnedreniya sistem ionoselektivnoi ochistki trapnykh vod ot radionuklidov na blokakh 1–2 NVAES-2 [Experience in implementation of systems applied for drainage water ion-selective purification from radionuclides at units 1–2 of Novovoronezh-2 NPP]. *ANRI – ANRI*, No. 4 (103), pp. 64–70. [in Russian]. DOI: 10.37414/2075-1338-2020-103-4-64-70.

3. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii No. 1069 “O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyaemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyaemykh radioaktivnykh otkhodov” [Government Decree of the Russian Federation dated No. 1069 “On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for classifying radioactive waste as special radioactive waste and disposable radioactive waste, and the criteria for classifying disposable radioactive waste”]. 2012.

4. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory. Data Base NNDC BNL. URL: <https://www.nndc.bnl.gov> (reference date: 08.06.2023).

5. Russian Library of Estimated Neutron Data Files (ROSFOND-2010). URL: <https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (reference date: 08.06.2023).

6. NEA/CRPPH/R(2014)2. Radiation Protection Aspects of Primary Water chemistry and Source-term Management. Report, April, 2014.

7. Ok Sung Lee. (2016). Nuclear power plants generate radioactive waste within the liquid antimony (Sb) and removal study. Dissertation. Chosun University.



8. IAEA-NSNI/OSART/07/142F. Report of the operational safety review team (OSART) mission to the Neckarwestheim Nuclear Power Plant. Germany. 8 to 24 October 2007 and follow-up visit 11 to 14 May 2009.
9. Stöckert H., Emmert H. and Meyer Ch. zu Schwabedissen. (1987). VGB-Kraftwerkstechnik, 67 (3), 288 p.
10. Sustacha Duo D., Leal A. (2004). Reduction of the collective doses in Almaraz Nuclear Power Plant through source term reduction and the workload reduction. 2004 ISOE International ALARA Symposium, Lyon (France), 24–26 March.
11. Dundar Y., Odar S., Streit K., Allsop H., Guzonas D. (1996). Application of KWU antimony removal process at Gentilly-2. International conference on water chemistry of nuclear reactor systems. Bournemouth (United Kingdom), 13–17 October.
12. Fu Pengtao, Dai Mingliang, Zhu Zhaowen, et al. Study of annual tritium discharge in pressurized water reactor based on historical data. High Power Laser and Particle Beams, 9022, 34:026009.
13. Karl-Heinz Neeb. (1997). The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors. Walter De Gruyter, 725 p.
14. Jaervimaeki S., Kvarnstrom R., Maekinen M., Maekelae K. (2014). Actions taken to significantly reduce activity levels on primary loop surfaces at Loviisa NPP. Proceedings of nuclear plant chemistry conference 2014, Sapporo (NPC 2014).
15. Berger M., Bretelle J. L., Rocher A. (2002). Impact of main radiological pollutants on contamination risks (ALARA) optimisation of physico-chemical environment and retention techniques during operation and shutdown. Third ISOE European Workshop. Portoroz, Slovenia, 17–19 April.
16. Gaudard G., Gilles B., Mesnage F., Cattant F. (2002). Improvements of primary coolant shutdown chemistry and reactor coolant system cleanup. Chemistry 2002: International conference on water chemistry in nuclear reactors systems – operation optimisation and new developments. Avignon (France), 22–26 April.
17. Johansson M. (2016). Ringhals – Operational Experience on Silver and Antimony related to doses. ISOE International Symposium. Brussels, 1–3 June.
18. Radiochemistry control of the fuel during reactor operation and shut-down reactor on “Kozloduy” NPP, unit 5 and 6. WANO Workshop on Fuel Integrity Monitoring. Temelin NPP, Czech Republic, 10–12 November, 2009.
19. Dobrevski I. (2011). WWER-1000 Coolant Chemistry Improvement by Extended Fuel Cycles. Additional information. IAEA-TECDOC-1666 companion CD.
20. GOST 5632-2014. Nerzhavayushchie stali i splavy korrozionno-stoikie, zharostoikie i zharoprochnye. Marki [GOST 5632-2014. Corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant stainless steels and alloys. Stamps]. 2014.

### Сведения об авторах

*Шаров Дмитрий Александрович*, руководитель департамента, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Семёновых Антон Сергеевич*, руководитель департамента, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Иванов Евгений Анатольевич*, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Аржаткин Владимир Геннадьевич*, заместитель руководителя департамента, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Крутских Денис Андреевич*, заместитель руководителя департамента, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Маракулин Игорь Игоревич*, начальник отдела, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Тяпков Владимир Федорович*, руководитель департамента, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Юдаков Алексей Юрьевич*, руководитель проекта, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25).

*Барабин Александр Викторович*, заместитель начальника цеха, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Гусев Игорь Николаевич*, заместитель главного инженера, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Поваров Владимир Петрович*, заместитель генерального директора, директор филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Росновский Сергей Викторович*, заместитель главного инженера, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Стацура Дмитрий Борисович*, заместитель главного инженера, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Щукин Алексей Павлович*, помощник директора, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Воронежская область, г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, д. 1).

*Курьиндин Антон Владимирович*, руководитель отделения, ФБУ «НТЦ ЯРБ» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

#### Authors credentials

*Sharov Dmitrii Aleksandrovich*, Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: DASHarov@vniiaes.ru.

*Semenovkykh Anton Sergeevich*, Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: ASSemenovkykh@vniiaes.ru.

*Ivanov Evgenii Anatolevich*, Deputy Director of VNIIAES-NTP, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: EAIvanov@vniiaes.ru.

*Arzhatkin Vladimir Gennadevich*, Deputy Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: VGArzhatkin@vniiaes.ru.

*Krutsikh Denis Andreevich*, Deputy Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: DAKrutsikh@vniiaes.ru.

*Marakulin Igor Igorevich*, Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: IIMarakulin@vniiaes.ru.

*Tyapkov Vladimir Fedorovich*, Head of Department, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: VFTiapkov@vniiaes.ru.

*Yudakov Aleksei Iurevich*, Project Manager, JSC “All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation” (25, Ferganskaya str., Moscow, 109507), e-mail: AYYudakov@vniiaes.ru.

*Barabin Alexandr Victorovich*, Deputy Head of the Workshop, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: BarabinAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Gusev Igor Nikolaevich*, Deputy Chief Engineer, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: GusevIN@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Povarov Vladimir Petrovich*, Deputy General Director, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Rosnovsky Sergey Victorovich*, Deputy Chief Engineer, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Statsura Dmitrii Borisovich*, Deputy Chief Engineer, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Schukin Alexey Pavlovich*, Assistant Director, Novovoronezh NPP branch of Rosenergoatom Concern JSC (1, Yuzhnaya industrial zone, Novovoronezh, Voronezh reg., 396072), e-mail: SchukinAP@nvnpp1.rosenergoatom.ru.

*Kuryndin Anton Vladimirovich*, Head of Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: kuryndin@secnrs.ru.

#### Для цитирования

*Шаров Д. А., Семёновых А. С., Иванов Е. А., Аржаткин В. Г., Крутских Д. А., Маракулин И. И.* и др. Определение источников поступления радиоизотопов сурьмы в трапные воды при эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1200 // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 2 (108). С. 82–96. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.005.

#### For citation

*Sharov D. A., Semenovych A. S., Ivanov E. A., Arzhatkin V. G., Krutskikh D. A., Marakulin I. I.*, et al. Determination of sources of antimony radioisotopes entering the drain water due to operation of the VVER-1200 reactor. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 2 (108), pp. 82–96. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.108.2.005.

