DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-277-286 УДК 621.039.577:621.039.76

РАДИОНУКЛИДНЫЙ СОСТАВ ВЫБРОСОВ ПЛАВУЧЕЙ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВОДООХЛАЖДАЕМОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ

А. А. Екидин¹, Е. И. Назаров¹, М. Е. Васянович¹, А. Н. Швалев²

¹ Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Российская Федерация) ² ООО «Неорадтех» (Обнинск, Российская Федерация)

000 «Пебрадтех» (Обнинск, тоссийская Федерац

Статья поступила в редакцию 7 марта 2025 г.

Для цитирования

Екидин А. А., Назаров Е. И., Васянович М. Е., Швалев А. Н. Радионуклидный состав выбросов плавучей АЭС малой мощности с водоохлаждаемой реакторной установкой // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 277—286. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-277-286.

Впервые выполнены экспериментальные исследования интенсивности и радионуклидного состава газоаэрозольных выбросов малого модульного реактора морского базирования. В обследованных источниках выброса радиоактивных веществ идентифицировано 11 радионуклидов. Поступление установленных радионуклидов создает облучение населения города Певек не выше 0,03 мкЗв/год, что многократно ниже установленной для АЭС дозовой квоты от облучения при выбросе в атмосферу радиоактивных веществ, равной 50 мкЗв/год. Определены основные радионуклиды, формирующие не менее 95% годовой эффективной дозы населения Певека от выбросов плавучих атомных теплоэлектростанций при нормальной эксплуатации: ³H, ¹⁴C, ⁴¹Ar. В первые годы эксплуатации плавучей атомной теплоэлектростанции удельный выброс составил 2,72·10⁻¹, 2,91·10⁻³, 1,53·10⁻² ГБк/ГВт·ч соответственно для ³H, ¹⁴C, ⁴¹Ar. Полученные значения удельного выброса могут быть приняты за базовые для оценки соответствия принципам методологии Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO) для всех последующих проектов малых модульных реакторов морского базирования.

Ключевые слова: малый модульный реактор, методология INPRO, плавучая атомная электростанция, радионуклиды, удельный выброс в атмосферу, устойчивое развитие, эффективная доза.

Введение

Возможности компактных корабельных реакторных установок по длительному автономному энергоснабжению судов надводного и подводного флота не могли не быть востребованы для обеспечения населения удаленных и малонаселенных территорий тепловой и электрической энергией. К 2022 г. по всему миру на различных стадиях разработки и развертывания насчитывалось не менее 83 проектов малых модульных реакторов (ММР), в том числе 9 морского базирования [1]. Серийное заводское изготовление, сокращение избыточных систем безопасности позволяют снизить стоимость и сроки строительства MMP [2].

Генерация электрической и тепловой энергии MMP морского базирования применима в регионах, для которых наземные атомные энергетические установки нерентабельны и нежизнеспособны [3]. Часто в таких регионах энергоснабжение обеспечивается за счет угольной или дизельной генерации. Переход на ядерные энергетические установки малой мощности позволяет повысить надежность производства энергии и существенно снизить выбросы вредных химических веществ, включая парниковые

[©] Екидин А.А., Назаров Е.И., Васянович М.Е., Швалев А. Н., 2025

Кораблестроение для Арктики

газы. Примером успешной реализации проекта ММР морского базирования является первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», размещенная в Чаунской губе Восточно-Сибирского моря для энергоснабжения города Певек. Ввод в промышленную эксплуатацию 22 мая 2020 г. ПАТЭС с двумя реакторами КЛТ-40С мощностью 35 МВт гарантирует надежное обеспечение электроэнергией и горячей водой жилых домов и промышленных предприятий региона расположения.

Важнейшими аспектами на всех этапах жизненного цикла атомных станций являются вопросы предотвращения аварий и обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды. Технические и инженерные решения, обеспечивающие безопасность эксплуатации ядерных энергетических установок малой мощности морского базирования в России, опираются на длительный опыт разработки и эксплуатации судовых реакторных установок [4]. Совершенствование ядерных реакторов для нужд флота сопровождалось требованием увеличения единичной мощности при одновременном уменьшении массогабаритных характеристик реактора, повышением безопасности и эксплуатационных характеристик [5]. Эффективная защита персонала ПАТЭС от радиационного воздействия обеспечивается эшелонированными барьерами безопасности [6]:

- керметная топливная композиция на основе диоксида урана;
- коррозионностойкий материал для оболочек твэлов;
- корпус реактора, герметичная система первого контура и биологическая защита из стали, бетона, воды;
- герметичное внешнее ограждение защитной оболочки и смежных с ней помещений.

Корпус плавучего энергоблока также играет роль барьера для несанкционированного поступления радиоактивных веществ в окружающую среду.

Уникальные решения при создании пассивной системы аварийного расхолаживания, естественная циркуляция теплоносителя в системе первого контура (пассивный теплосъем в аварийных режимах), возможности саморегулирования мощности, самоглушения и самоограничения мощности без использования аварийной защиты обеспечивают пренебрежимо малые риски радиационных аварий с негативными последствиями для населения и окружающей среды [6].

Подтверждение безопасности эксплуатации ПАТЭС для населения и окружающей среды обеспечивается функционированием систем контроля выбросов радиоактивных веществ и мониторинга радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне и на территории Певека [7; 8]. Независимая оценка радиационной обстановки на территории города показала отсутствие изменений мощности дозы и интенсивности радиоактивных выпадений за первые два года эксплуатации ПАТЭС «Академик Ломоносов» [9].

Данные долговременных наблюдений за выбросами ПАТЭС важны не только для подтверждения отсутствия угрозы для здоровья человека и защищенности экосистемы, но и для последующего совершенствования технологий ММР морского и наземного базирования. В отличие от действующих наземных АЭС по эксплуатируемым корабельным реакторным установкам отсутствуют готовые базы данных о выбросах радиоактивных веществ, формирующих основное облучение населения. Причина такой ситуации объективна и заключается в отсутствии облучаемого населения на маршрутах следования судов с энергетическими ядерными установками, вследствие чего нет необходимости в нормировании выбросов радиоактивных веществ и контроле для подтверждения соблюдения ограничений облучения населения. Контроль с целью ограничения поступления радиоактивных веществ в окружающую среду при нормальной эксплуатации корабельных реакторных установок выполняется согласно отраслевому нормативу 1 и ограничен измерениями в воздухе объемной бета-активности аэрозолей и паров йода-131.

Количество радионуклидов, для которых должна выполняться оценка дозы при попадании в окружающую среду от выбросов при нормальной эксплуатации атомных электростанций, существенно шире. Методика² подчеркивает необходимость проведения радиационно-технического обследования и инструментальной инвентаризации источников выбросов радиоактивных веществ организации для определения перечня радионуклидов, подлежащих нормированию и контролю. Это обстоятельство не позволяет опираться на данные радиационного контроля выбросов корабельных реакторных установок для обоснования перечня контролируемых радионуклидов ММР морского базирования [10; 11]. Формировать такой перечень на основе результатов контроля выбросов Билибинской АЭС сопоставимой мощности некорректно, так как они специфичны для реакторных установок с графитовым замедлителем [12]. Модельные оценки и экспериментальные исследования показали, что для каждого типа реакторной установки характерен свой перечень радионуклидов, формирующих 99% эффективной дозы от выбросов радиоактивных веществ при нормальной

¹ Приказ Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Об утверждении Перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений» от 9 декабря 2020 г. № 1/14-НПА.

² Методика разработки и установления нормативов ПДВ РВ в атмосферный воздух. — Утв. приказом Ростехнадзора от 7 ноября 2012 г. № 639.



Рис. 1: a — воздухофильтрующая установка, δ — пробоотборный стенд ³Н и ¹⁴С, B — специальный сосуд Маринелли Fig. 1: a — air filtering unit, δ — sampling stand ³H and ¹⁴C, B — special Marinelli vessel

эксплуатации [13; 14]. Анализ образования радиоактивных отходов при нормальной эксплуатации ММР показал, что тип реакторной установки, используемые замедлитель и теплоноситель, водно-химический режим работы реакторной установки, степень обогащения топлива, вид топливной композиции, размеры активной зоны оказывают существенное влияние на объем, активность и радионуклидный состав радиоактивных отходов [15]. Те же особенности реакторных установок могут оказывать существенное влияние на формирование состава и активности выбросов ММР.

Важным аспектом формирования перечня контролируемых в выбросе радионуклидов является возможность оценки соответствия уровней радиационного воздействия выбросов ПАТЭС при нормальной эксплуатации принципам устойчивого развития ядерной энергетической системы, сформулированным МАГАТЭ в рамках методологии Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO) [16—18]. Для реализации базового принципа методологии INPRO новые атомные электростанции должны быть более безопасны для персонала, населения и окружающей среды, чем сопоставимые АЭС, находящиеся в настоящее время в эксплуатации. Для убедительного снижения радиационного воздействия целесообразно показать снижение выброса радиоактивных веществ на единицу производимой энергии новыми АЭС.

Подтвердить или опровергнуть специфические характеристики источников выброса плавучей ММР с водоохлаждаемой реакторной установкой возможно только в ходе выполнения радиационно-технических обследований с использованием приборов и методов измерения активности радионуклидов, обеспечивающих предел измерения на порядки ниже штатных методов радиационного контроля [12]. Результаты такого исследования могут быть использованы для подтверждения адекватности и совершенствования применяемой на ПАТЭС системы радиационного контроля выбросов радиоактивных веществ.

Материалы и методы

При эксплуатации ПАТЭС радиоактивные вещества могут поступать в атмосферный воздух через два источника выбросов: главную мачту, расположенную на 8-м ярусе плавучего энергоблока, и вентиляционную трубу хранилища отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ). Газовоздушная смесь для выброса через главную мачту поступает через три подводящие трубы (центральную, правую, левую), в которых производился отбор проб.

Отбор радиоактивных аэрозолей осуществлялся в основании вентиляционной трубы с помощью воздухофильтрующей установки ВФУ-1200 (рис. 1а) с максимальной производительностью 1200 м³/ч [11; 12] и фильтрующих материалов ФПС-ВГ, СФМ-2И-ПС, АФА-ЗДА. Объем прокаченного воздуха для каждой пробы составлял 12 000—21 000 м³. Отбор газообразных ³Н и ¹⁴С осуществлялся с помощью мобильного пробоотборного стенда (рис. 16). Радиоактивные инертные газы отбирались в специальный сосуд Маринелли (рис. 1в) под давлением 3—5 ат с помощью компрессора [12].

Использованные в исследовании методы и технические средства позволили снизить предел обТаблица 1. Нижние пределы обнаружения штатных и применяемых в работе методов измерения радионуклидов в выбросах ПАТЭС

Table 1. Lower detection limits of standard and applied methods for measuring radionuclides in emissions from floating nuclear power plants

	Объемная активность, Бк/м ³		
Радионуклид	СРК-05Р	Используемые в работе методы	
131	3,0·10 ⁻¹	1,1·10 ⁻⁵	
ИРГ	3,7·10 ⁴	Не выше 3,3·10 ²	
⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co, ⁹⁵ Nb, ¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs	3,8·10 ⁻²	Не выше 5,0·10⁻⁵	
³ Н	—	Не выше 5,0	
¹⁴ C	—	Не выше 2,0	

наружения по сравнению со штатными системами контроля радионуклидов в выбросах в атмосферу ПАТЭС (СРК-05Р) [7; 8] (табл. 1) для аэрозолей на 3—4 порядка, для инертных радиоактивных газов (ИРГ) — на 2 порядка.

Полученные данные о значениях объемной активности радионуклидов в выбросах ПАТЭС позволили выполнить оценку радиационного воздействия на население Певека при нормальной эксплуатации плавучего энергоблока. Расчет годовой эффективной дозы облучения населения от выбросов ПАТЭС выполнен на основе консервативного подхода [19], показывающего максимально возможные уровни облучения людей с учетом всех путей облучения.

Для оценки соблюдения принципов методологии INPRO при нормальной эксплуатации ПАТЭС рассчитывался удельный показатель выброса для каждого радионуклида, участвующего в формировании 99% годовой эффективной дозы облучения населения. Удельный показатель выброса радионуклида является универсальным нормализованным на величину произведенной электроэнергии значением активности, поступившей в атмосферу за рассматриваемый период. Такой нормализованный показатель демонстрирует активность выброса радиоактивного вещества на единицу произведенной электроэнергии, что позволяет сравнивать различные типы реакторных установок по радиационному воздействию при сопоставимом уровне производства энергии.

Для формализации расчетов и анализа полученных данных вводятся следующие условные обозначения: W_{ij} — годовой выброс ПАТЭС *i*-го радионуклида в *j*-й год, ГБк/год; E_j — годовое производство электроэнергии ПАТЭС в *j*-й год, ГВт·ч; Q_{ij} — удельный показатель выброса ПАТЭС *i*-го радионуклида в *j*-й год, ГБк/ГВт·ч. Расчет искомой величины удельного показателя выброса Q_{ij} для *i*-го радионуклида за *j*-й год наблюдения ведется по формуле

$$Q_{ij} = W_{ij} / E_j. \tag{1}$$

Каждое отдельное значение Q_{ij} характеризует активность *i*-го радионуклида на каждый ГВт·ч произведенной электроэнергии в конкретный *j*-й год.

Производство электроэнергии за рассматриваемый интервал времени составило: 175,6 ГВт·ч (2021 г.), 159,6 ГВт·ч (2022 г.), 196,2 ГВт·ч (2023 г.) [20]. Значения годового выброса были получены в результате выполненных исследований и публичных экологических отчетов ПАТЭС [7; 8].

Результаты расчета использовались для сравнения с аналогичными показателями однотипных реакторных установок и энергетических ядерных реакторов других типов.

Результаты

Применяемые в исследованиях приборы и методы служат для идентификации и определения активности продуктов деления ядерного топлива, продуктов активации теплоносителя и продуктов активации коррозии конструкций реакторной установки. В частности, определены радионуклиды, сформированные в результате:

- деления ядер топлива ^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ⁹⁰Sr, ⁹⁵Nb, ¹³¹I, ¹³³I, ¹³³Xe, ¹³⁴Cs, ¹³⁵Xe, ¹³⁷Cs, ¹⁴¹Ce, ¹⁴⁴Ce;
- активации теплоносителя ³H, ¹⁴C, ²⁴Na, ⁴¹Ar;
- активации продуктов коррозии ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ⁹⁵Zr, ^{110m}Ag.

Из рассматриваемых радионуклидов в источнике выбросов ХОЯТ технологически невозможно присутствие ³H, ¹⁴C, изотопов йода и ИРГ. Установлено, что при хранении отработавшего ядерного топлива в атмосферу поступает газовоздушная смесь, содержащая 6 радионуклидов (табл. 2). При нормальной эксплуатации ядерной установки через главную мачту в атмосферу поступает газовоздушная смесь, содержащая 11 радионуклидов (см. табл. 2).

Значения объемной активности остальных радионуклидов были ниже порога обнаружения.

Полученные значения объемной активности газов и аэрозолей позволили выполнить консервативную оценку годовой эффективной дозы от выбросов ПАТЭС. Суммарная годовая доза от выбросов всех радионуклидов не превышает 3·10⁻² мкЗв. Полученное максимально возможное значение облучения населения Певека существенно ниже установленной для АЭС дозовой квоты ³ от облучения при выбросе в атмосферу радиоактивных веществ (50 мкЗв/год) и значительно ниже установленного уровня минимально значимой дозы ⁴ (10 мкЗв/год) для любой деятельности, связанной с использованием радио-

³ СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03).

⁴ Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ.

Таблица 2. Результаты измерений объемной активности радионуклидов в выбро	сах
ПАТЭС и рассчитанная средняя величина активности годового выброса	

Радио-	Диапазон измеренной объемной активности, Бк/м³		Рассчитанный средний годовой выброс, Бк	
нуклид	хоят	Главная мачта	хоят	Главная мачта
³H	_	0,3·10 ² —2,4·10 ³	—	4,79·10 ¹⁰
¹⁴ C	_	0,8·10 ¹ —2,5·10 ¹	—	5,12·10 ⁸
⁴¹ Ar	—	3,2·10 ³ —1,3·10 ⁴	—	2,19·10 ¹¹
⁵⁴ Mn	—	0,3.10-4-3,1.10-4	—	8,06·10 ³
⁵⁸ Co	_	0,1.10-4-1,8.10-4	—	4,50·10 ³
⁶⁰ Co	0,3.10-4-2,1.10-4	0,4.10-4-6,8.10-4	1,03·10 ⁴	1,71·10 ⁴
⁹⁰ Sr	1,2·10 ⁻⁵ —9,7·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵ —7,4·10 ⁻⁵	6,54·10 ³	1,99·10 ³
⁹⁵ Nb	0,9·10 ⁻⁵ —5,9·10 ⁻⁵	0,4.10-4-1,6.10-4	4,08·10 ³	4,74·10 ³
^{110m} Ag	1,1·10 ⁻⁵ —9,5·10 ⁻⁵	0,2.10-4—1,5.10-4	3,52·10 ³	4,03·10 ³
131	_	2,5.10-4-4,1.10-4	—	1,96·10 ³
¹³⁷ Cs	2,4·10 ⁻⁴ —5,5·10 ⁻⁴	1,2.10-4-7,0.10-4	4,74·10 ⁴	8,86·10 ³
¹⁴⁴ Ce	0,3.10-4-2,1.10-4	_	7,08·10 ³	_

Table 2. Results of measurements of the activity concentration of radionuclides in the emissions of the floating nuclear power plant and the calculated average value of the annual emission activity

активных и ядерных материалов. Основной вклад в облучение населения (не менее 95%) вносят три радионуклида: ³H, ¹⁴C и ⁴¹Ar (рис. 2).

Обсуждение

Исследования демонстрируют пренебрежимо малое радиационное воздействие на население выбросов радиоактивных веществ в атмосферу при нормальной эксплуатации плавучей АЭС. Низкие значения годовой эффективной дозы от выбросов радиоактивных веществ (от 0,07 до 0,67 мкЗв/год) являются характерными для АЭС России с реакторными установками ВВЭР [11]. Полученные данные подтверждают вывод ранее выполненных исследований об отсутствии влияния выбросов ПАТЭС на радиоэкологическую ситуацию в районе ее расположения [9].

Применявшиеся в рамках проведенных исследований приборы и методы позволили идентифицировать 12 радионуклидов, из которых ³H и ¹⁴С не входят в программу радиационного контроля источников выброса ПАТЭС. Для наземных АЭС с реакторными установками ВВЭР или PWR указанные радионуклиды входят в число контролируемых, так как формируют значительную долю облучения населения. Выполненный анализ показал, что вклад неучитываемых радионуклидов ³H и ¹⁴С в суммарную эффективную дозу облучения населения составляет примерно 40% и 30% соответственно.



Рис. 2. Вклад радионуклидов в годовую эффективную дозу Fig. 2. Share of radionuclides in the annual effective dose

Поэтому для этих радионуклидов целесообразно организовать контроль для оценки радиационного воздействия при дальнейшей эксплуатации,

Кораблестроение для Арктики

в том числе и во время ремонтных работ. Вклад в облучение населения других идентифицированных в проведенных исследованиях радионуклидов, не контролируемых в рамках производственной программы радиационного контроля выбросов, составляет не более 0,1%. Согласно принципу оптимизации ⁵ как одному из основных принципов обеспечения радиационной безопасности, пренебрежимо малый вклад в облучение радионуклидов ⁹⁰Sr, ⁹⁵Nb, ^{110m}Ag, ¹⁴⁴Се позволяет обоснованно исключить их из программы мониторинга выброса радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации ПАТЭС.

Полученные результаты позволяют провести оценку соответствия нормальной эксплуатации ПАТЭС базовым принципам устойчивого развития национальной ядерной энергетической системы. По рассмотренным выше причинам ПАТЭС, являясь первой и единственной АЭС на основе ММР морского базирования, не имеет в прошлом эксплуатируемых аналогов для сравнения состава и интенсивности выбросов радиоактивных вешеств. Текуший опыт эксплуатации ПАТЭС формирует базовую линию для сравнения нормализованных выбросов всех следующих проектов ММР морского базирования. В такой ситуации для сравнения уместно использовать результаты расчетов показателей удельного выброса радионуклидов, определяющих радиационное воздействие на население: ³H, ¹⁴C и ИРГ. Для этого по формуле (1) получены значения выброса ПАТЭС, нормализованные на произведенную электроэнергию, и выполнено сравнение с аналогичными показателями эксплуатируемых наземных АЭС [21—26].

Выбросы трития. Для АЭС с любым типом реакторных установок характерен высокий вклад трития в суммарную активность выброса и формирование облучения населения [11; 13; 27]. Анализ данных о выбросах эксплуатируемых в мире АЭС показал, что в среднем каждая станция выбрасывает 4,28.10-1 ГБк/ГВт.ч трития [22]. Все АЭС различаются по величине удельного выброса трития. Четверть эксплуатируемых АЭС характеризуется лучшей практикой и выбрасывает в среднем 3,46·10-2 ГБк/ГВт·ч трития [23]. Еще половина АЭС относится к устойчивым практикам и выбрасывает в среднем 1,31·10⁻¹ ГБк/ГВт·ч трития. Оставшаяся четверть АЭС демонстрирует наихудшую практику с выбросами трития — в среднем 2,96·10¹ ГБк/ГВт·ч [23]. Для АЭС с реакторными установками PWR и ВВЭР среднее значение удельного выброса составляет 1,90·10-1 ГБк/ГВт ч [23]. Рассчитанное значение удельного выброса трития за прошедшие годы эксплуатации ПАТЭС составил 2,72.10-1 ГБк/ГВт.ч. Полученное значение на 43% больше, чем средний удельный выброс трития в выборке наземных АЭС ВВЭР и PWR, но на 36% меньше, чем средний удельный выброс, рассчитанный для всех действующих АЭС, и в 109 раз меньше среднего удельного выброса трития АЭС выборки наихудшей практики.

Выбросы радиоуглерода. Существенный вклад в суммарную активность выброса АЭС и в формирование облучение населения вносит ¹⁴С [13; 21]. В среднем каждая АЭС выбрасывает 8,70·10⁻² ГБк/ ГВт·ч ¹⁴С. Четверть АЭС из выборки лучших практик выбрасывает не более 2,40·10⁻² ГБк/ГВт·ч ¹⁴С [22]. Рассчитанное значение удельного выброса ¹⁴С за первые годы эксплуатации ПАТЭС составило 2,91·10⁻³ ГБк/ГВт·ч. Полученное значение в 30 раз меньше, чем средний удельный выброс, рассчитанный для всех действующих АЭС, и в 8 раз меньше удельного выброса ¹⁴С АЭС выборки лучшей практики.

Выбросы инертных радиоактивных газов. В выбросах любой АЭС в режиме нормальной эксплуатации содержатся инертные радиоактивные газы [28]. Рассчитанные значения удельного выброса ⁴¹Ar и ¹³³Xe за первые годы эксплуатации ПАТЭС составили соответственно 1,53·10⁻² и 7,95·10⁻³ ГБк/ ГВт·ч. Полученные значения в 1320 раз меньше, чем средний удельный выброс ⁴¹Ar, и в 52 раза меньше, чем средний удельный выброс ¹³³Xe, рассчитанные для всех действующих АЭС [24].

Дополнительно выполнено сравнение удельных показателей для некоторых радионуклидов, формирующих пренебрежимо малый вклад в эффективную дозу облучения населения, но важных с точки зрения раннего реагирования на потенциальные отклонения ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs и ¹³¹I.

Выбросы радиоактивных изотопов цезия. При нормальной эксплуатации ПАТЭС в атмосферу поступает 4,96·10⁻⁵ ГБк/ГВт·ч ¹³⁷Сs и 4,95·10⁻⁵ ГБк/ ГВт·ч ¹³⁴Сs, что соответственно в 17 и 172 раза больше, чем в среднем для каждой наземной АЭС [25].

Выбросы радиоактивного йода. В среднем каждая наземная АЭС выбрасывает 3,80·10⁻⁴ ГБк/ ГВт·ч ¹³¹I [26]. Эта величина в 42 раза выше, чем соответствующий показатель для выброса ¹³¹I за первые годы эксплуатации ПАТЭС, а именно 9,07·10⁻⁶ ГБк/ГВт·ч.

Вывод о соблюдении базового принципа методологии INPRO на основе приведенного анализа следует формировать с учетом вклада в облучение населения выбросов рассмотренных радионуклидов. Не менее 95% годовой дозы облучения населения от выбросов радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации ПАТЭС из числа рассмотренных формируется изотопами ³H, ¹⁴C, ⁴¹Ar. Интенсивность выбросов указанных радионуклидов при производстве электроэнергии ПАТЭС не нарушает базового принципа методологии INPRO по устойчивому развитию ядерной энергетической системы. Контролируемые изотопы ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs и ¹³¹I формируют пренебрежимо малый вклад в дозу населения Певека — менее 0,0427%, 0,0015% и 0,0001% соответственно, однако данные радионуклиды являются важными ин-

⁵ СанПин 2.6.1.24-03...

дикаторами нарушения нормальной эксплуатации реакторной установки.

Заключение

Выполненные исследования газоаэрозольных выбросов ПАТЭС позволили получить количественный и качественный состав радионуклидов, поступающих в атмосферу при нормальной эксплуатации малого модульного реактора морского базирования. Экспериментальные данные показали, что состав выбросов водо-водяной энергетической установки КЛТ-40 соответствует выбросам наземных энергоблоков с реакторными установками ВВЭР.

Консервативная оценка радиационного воздействия ПАТЭС на население Певека за счет газовоздушных выбросов в атмосферный воздух при эксплуатации энергоблока на номинальной мощности не превышает 0,03 мкЗв/год, что существенно ниже установленной для АЭС дозовой квоты от облучения при выбросе в атмосферу радиоактивных веществ, равной 50 мкЗв/год. Основной вклад в облучение населения от выбросов формируют три радионуклида: ³H, ¹⁴С и ⁴¹Ar.

В результате исследований в программу радиационного контроля выбросов ПАТЭС дополнительно включены нормируемые радионуклиды ³H, ¹⁴C.

Анализ совокупности полученных данных о радионуклидном составе, интенсивности выброса и произведенной электроэнергии в первые годы эксплуатации ПАТЭС позволяет сформировать базовую линию для сравнения нормализованных выбросов всех последующих проектов ММР морского базирования. Удельные показатели выброса для основных дозообразующих радионуклидов:

- 2,72·10⁻¹ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ³Н;
- 2,91·10⁻³ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ¹⁴С;
- 1,53·10⁻² ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ⁴¹Ar.
- Удельные показатели отдельных контролируемых радионуклидов:
- 7,95·10⁻³ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ¹³³Хе;
- 9,07·10⁻⁶ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ¹³¹I;
- 4,96·10⁻⁵ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ¹³⁷Сs;
- 4,95·10⁻⁵ ГБк/ГВт·ч выброс в атмосферу ¹³⁴Сs.

Эксплуатация ПАТЭС уникальна с точки зрения совершенствования систем контроля выбросов и требует дополнительных исследований при выполнении различных технологических операций: переходных процессов в работе реакторных установок, при перегрузке топлива, в период окончания топливной кампании.

Финансирование

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Литература/References

1. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors

Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA, 2022.

2. Соловьев С. Л., Зарюгин Д. Г., Калякин С. Г., Лескин С. Т. Определение основных направлений развития атомных станций малой мощности // Изв. высш. учеб. заведений. Ядер. энергетика. — 2022. — № 1. — С. 22—34. — DOI: 10.26583/пре.2022.1.02.

Soloviev S. L., Zaryugin D. G., Kalyakin S. G., Leskin S. T. Definition of the main directions of development of low-power nuclear power plants. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika, 2022, no. 1, pp. 22—34. DOI: 10.26583/npe.2022.1.02. (In Russian).

3. Small Modular Reactors for Marine-based Nuclear Power Plant Technologies, Designs and Applications A supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA, 2023.

4. Зверев Д. Л., Фадеев Ю. П., Пахомов А. Н., Полуничев В. И. Опыт создания и перспективы развития ядерных энергетических установок для ледокольного флота и энергообеспечения арктического региона // Атом. энергия. — 2018. — Т. 125, № 6. — С. 318—322.

Zverev D. L., Fadeev Yu. P., Pakhomov A. N., Polunichev V. I. Nuclear Power Plants for the Icebreaker Fleet and Power Generation in the Arctic Region: Development Experience and Future Prospects. Atomic Energy, 2019, vol. 125, no. 6, pp. 359—364. DOI: 10.1007/ s10512-019-00494-5.

5. Зверев Д. Л., Неевин С. М., Доронков В. Л., Соколова Л. Б. Корабельные ядерные реакторные установки — от первого поколения к пятому // Атом. энергия. — 2020. — Т. 129, № 1. — С. 13—20.

Zverev D. L., Neevin S. M., Doronkov V. L., Sokolova L. B. Nuclear Ship Reactor Installations: From Gen 1 to 5. Atomic Energy, 2020, vol. 129, no. 1, pp. 1—7. DOI: 10.1007/s10512-021-00704-z.

6. Беляев В. М., Большухин М. А., Пахомов А. Н. и др. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атом. энергия. — 2020. — Т. 129, № 1. — С. 37—43.

Belyaev V. M., Bol'shukhin M. A., Pakhomov A. N. et al. The World's First Floating NPP: Origination and Direction of Future Development. Atomic Energy, 2020, vol. 129, no. 1, pp. 27—34. DOI: 10.1007/s10512-021-00707-w.

7. Отчет по экологической безопасности за 2022 год «Плавучая атомная теплоэлектростанция» / Филиал АО «Концерн Росэнергоатом». — Певек, 2023.

Environmental Safety Report for 2022 "Floating Nuclear Thermal Power Plant". Rosenergoatom JSC. Pevek, 2023. (In Russian).

8. Отчет по экологической безопасности за 2023 год «Плавучая атомная теплоэлектростанция» / Филиал АО «Концерн Росэнергоатом». — Певек, 2024.

Environmental Safety Report for 2023 "Floating Nuclear Thermal Power Plant". Rosenergoatom JSC. Pevek, 2024. (In Russian).

9. *Екидин А. А., Назаров Е. И., Антонов К. Л.* Радиационная ситуация района расположения плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» в начальный период эксплуатации // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4 (52). — С. 559—569. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-559-569.

Ekidin A. A., Nazarov E. I., Antonov K. L. Radiation situation in the area of the floating nuclear power plant "Akademik Lomonosov" during the initial period of operation. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 4 (52), pp. 559—569. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-559-569. (In Russian).

10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations. New York, 2017.

11. Vasyanovich M. E., Ekidin A. A., Vasilyev A. V. et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. J. of Environmental Radioactivity, 2019, vol. 208—209, p. 106006. DOI: 10.1016/j. jenvrad.2019.106006.

12. Екидин А. А., Васянович М. Е., Васильев А. В. и др. Определение радионуклидного состава и оценка доз облучения населения за счет атмосферных выбросов российских АЭС // Траектория исследований — человек, природа, технологии. — 2022. — № 2 (2). — С. 53—63. — DOI: 10.56564/27825264_2022_2_53.

Ekidin A. A., Vasyanovich M. E., Vasilev A. V. et al. Determination of radionuclide composition and assessment of radiation doses to the population due to atmospheric emissions of Russian nuclear power plants. Traektoriya issledovanii — chelovek, priroda, tekhnologii, 2022, no. 2 (2), pp. 53—63. DOI: 10.56564/27825264_2022_2_53. (In Russian).

13. Екидин А. А., Жуковский М. В., Васянович М. Е. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС // Атом. энергия. — 2016. — Т. 120, № 2. — С. 106—108.

Ekidin A. A., Zhukovskii M. V., Vasyanovich M. E. Identification of the Main Dose-Forming Radionuclides in NPP Emissions. Atomic Energy, 2016, vol 120, no. 2, pp. 106—108. DOI: 10.1007/s10512-016-0107-x. (In Russian).

14. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekidin A. et al. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases. Nuclear Engineering and Technology, 2019, vol. 51, no. 4, pp. 1176—1179. DOI: 10.1016/j.net.2019.02.010.

15. Krall L. M., Macfarlane A. M., Ewing R. C. Nuclear waste from small modular reactors. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A, 2022, vol. 119, no. 23, p. e2111833119. DOI: 10.1073/pnas.2111833119.

16. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO. Manual. Vol. 1—9. International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1575/Rev.1. Vienna, IAEA, 2008. 17. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. IAEA Nuclear Energy Ser. No. NG-T-3.15. International Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA, 2016. 18. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Safety of Nuclear Reactors. INPRO Manual. IAEA-TECDOC-1902. International Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA, 2020.

19. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106— 21. — М.: НТЦ ЯРБ, 2021.

Recommended Methods for Calculation of Parameters Necessary to Develop and Establish Standards for Maximum Permissible Emissions of Radioactive Substances into Atmosphere. RB-106-21. Moscow, 2021. (In Russian).

20. The Power Reactor Information System (PRIS). International Atomic Energy Agency. Available at: https:// pris.iaea.org/pris/home.aspx.

21. Назаров Е. И., Екидин А. А., Васильев А. В. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС // Изв. вузов. Физика. — 2018. — Т. 61, № 12-2 (732). — С. 67—73.

Nazarov E. I., Ekidin A. A., Vasiliev A. V. Assessment of carbon-14 emissions into the atmosphere due to NPP emissions. Izvestiya vuzov. Fizika, 2018, vol. 61, no. 12-2 (732), pp. 67—73. (In Russian).

22. Nazarov E., Ekidin A., Vasilyev A., Pyshkina M., Vasyanovich M. Tritium and Carbon-14 in Releases of Nuclear Reactor Facilities of Various Types. RAP Conference Proceedings, 2019, vol. 4, pp. 47—52. DOI: 10.37392/ RapProc.2019.10.

23. Десятов Д. Д., Екидин А. А., Власов Д. А. Вклад АЭС с различным типом реакторных установок в глобальное поступление трития в окружающую среду // Атом. энергия. — 2024. — Т. 137, № 3-4. — С. 175—180.

Desyatov D. D., Ekidin A. A., Vlasov D. A. Contribution of NPPs with different types of reactor installations to the global tritium release into the environment. Atomic Energy, 2024, vol. 137, no. 3-4, pp. 175—180. (In Russian).

24. Пыркова А. А., Екидин А. А., Антонов К. Л. Поступление инертных радиоактивных газов в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС // Физика. Технологии. Инновации: Сборник материалов VI Международной молодежной научной конференции, посвященной 70-летию основания Физико-технологического института УрФУ. — Екатеринбург, 2019. — С. 279—287.

Pyrkova A. A., Ekidin A. A., Antonov K. L. Emission of inert radioactive gases into the atmosphere during normal operation of NPPs Emission of inert radioactive gases into the atmosphere during normal operation of NPPs. Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu osnovaniya Fiziko-tekhnologicheskogo instituta UrFU. Ekaterinburg, 2019, pp. 279—287. (In Russian).

25. Десятов Д. Д., Екидин А. А., Голиборода С. Г. Поступление радиоактивного цезия в окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС // Атом. энергия. — 2023. — Т. 134, № 1-2. — С. 85—90.

Desyatov D. D., Ekidin A. A., Goliboroda S. G. Release of radioactive cesium to the environment during standard NPP operations. Atomic Energy, 2023, vol. 134, no. 1-2, pp. 112—120. DOI: 10.1007/s10512-023-01034-v.

26. Екидин А. А., Антонов К. Л., Назарович А. В. Оценка удельной активности выброса иода для соблюдения базового принципа методологии INPRO на примере АЭС с PWR и BWR // Атом. энергия. — 2021. — Т. 131, № 5. — С. 285—291.

Ekidin A. A., Antonov K. L., Nazarovich A. V. Estimation of the Specific Activity of Iodine Release to Comply with the Base Principle of INPRO Methodology for

РWR, BWR NPP. Atomic Energy, 2022, vol. 131, no. 2, pp. 291—297. DOI: 10.1007/s10512-022-00881-5. 27. Крышев А. И., Васянович М. Е., Екидин А. А. и др. Поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС с ВВЭР и оценка дозы облучения населения // Атом. энергия. — 2020. — Т. 128, № 6. — С. 333—336.

Kryshev A. I., Vasyanovich M. E., Ekidin A. A. et al. Tritium Entry into the Atmosphere with Emissions from NPP-VVER and Population Irradiation Dose Assessment. Atomic Energy, 2020, vol. 128, no. 6, pp. 362—367. DOI: 10.1007/s10512-021-00703-0.

28. Крышев А. И., Сазыкина Т. Г., Васянович М. Е. и др. Радионуклидный состав газообразных выбросов АЭС и оценка дозы облучения населения // Атом. энергия. — 2021. — Т. 130, № 5. — С. 286—291.

Kryshev A. I., Sazykina T. G., Vasyanovich M. E. et al. Radionuclide Composition of NPP Gas Emissions and Population Radiation Dose Assessment. Atomic Energy, 2021, vol. 130, no. 5, pp. 304—309. DOI: 10.1007/ s10512-021-00814-8.

Информация об авторах

Екидин Алексей Акимович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: ekidin@mail.ru.

Назаров Евгений Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: nei@ ecko.uran.ru.

Васянович Максим Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: vme@ecko.uran.ru.

Швалев Александр Николаевич, ведущий инженер, ООО «Неорадтех» (249032, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Курчатова, д. 19а), e-mail: samek@mail.ru.

RADIONUCLIDE COMPOSITION OF EMISSIONS FROM A LOW-POWER FLOATING NUCLEAR POWER PLANT WITH A WATER-COOLED REACTOR INSTALLATION

Ekidin, A. A.¹, Nazarov, E. I.¹, Vasyanovich, M. E.¹, Shvalev A. N.²

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia Federation) ² LLC "Neoradtech" (Obninsk, Russian Federation)

The article was received on March 7, 2025

For citing

Ekidin A. A., Nazarov E. I., Vasyanovich M. E., Shvalev A. N. Radionuclide composition of emissions from a low-power floating nuclear power plant with a water-cooled reactor installation. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 277—286. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-277-286. (In Russian).

Abstract

For the first time, experimental studies of the intensity and radionuclide composition of gas-aerosol emissions from a small modular marine reactor have been performed. Eleven radionuclides have been identified in the investigated sources of radioactive emissions. Atmospheric emissions of the identified radionuclides create an irradiation of the Pevek population of less than 0.03 μ Sv/year, which is many times lower than the dose quota for radiation from the release of radioactive substances into the atmosphere established for the NPP, equal to 50 μ Sv/year. The main radionuclides that form at least 95% of the annual effective dose of the population of Pevek from the floating nuclear power plant emissions during normal operation have been identified: ³H, ¹⁴C, ⁴¹Ar. In the first years of operation of the floating NPP, the specific emission was 2.72·10⁻¹ GBq/GW·h, 2.91·10⁻³ GBq/GW·h, 1.53·10⁻² GBq/GW·h, respectively, for ³H, ¹⁴C, ⁴¹Ar. The obtained values of specific emission can be taken as the baseline for assessing compliance with the principles of the INPRO methodology for all subsequent projects of marine small modular reactors.

Keywords: small modular reactor, INPRO methodology, floating nuclear power plant, radionuclides, specific air emissions, sustainable development, effective dose.

Funding

The study was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FUMN-2024-0001.

Information about the authors

Ekidin, Aleksey Akimovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: ekidin@mail.ru.

Nazarov, Evgeniy Igorevich, PhD in Engineering, Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: nei@ ecko.uran.ru.

Vasyanovich, Maxim Evgenievich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: vme@ecko.uran.ru.

Shvalev, Alexander Nikolaevich, Leading Engineer, Neoradtech LLC (19a, Kurchatov St., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032), e-mail: samek@mail.ru.

© Ekidin A. A., Nazarov E. I., Vasyanovich M. E., Shvalev A. N., 2025