

АКТИВНОСТЬ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕАКТОРАХ ПАТЭС В ТЕЧЕНИЕ ВСЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

С. В. Антипов, В. П. Билашенко, М. Н. Кобринский

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2023 г.

Для цитирования

Антипов С. В., Билашенко В. П., Кобринский М. Н. Активность и изотопный состав радионуклидов, образующихся в реакторах ПАТЭС в течение всего жизненного цикла // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 4—11. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-4-11.

Получены оценки активности и состава радионуклидов, которые накопятся в реакторах плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) после завершения последней топливной кампании. Анализ реактивностных аварий, происходивших на транспортных ядерных энергетических установках, показал, что наиболее негативные последствия для населения и окружающей среды возникают вследствие самоподдерживающейся цепной реакции при разгерметизированном реакторе. Такое событие в принципе может произойти и на ПАТЭС. Оценки для реактора КЛТ-40С получены на основе расчетов для реактора КЛТ-40. Учтены проектная энерговыработка, длительность кампании, обогащение топлива, а также срок службы ПАТЭС.

Ключевые слова: Арктическая зона России, Северный морской путь, плавучая атомная теплоэлектростанция, радиационная безопасность, техногенные радионуклиды, накопление радионуклидов.

Введение

Российская Федерация в качестве одного из главных приоритетов избрала курс на опережающее развитие Арктической зоны, зафиксировав это в ряде документов высшего уровня [1—4]. Курс на опережающее освоение Арктической зоны требует решения ряда важнейших экологических проблем, оказывающих непосредственное влияние на темпы и результаты этого процесса. Одной из важных задач в этой области является повышение радиационной безопасности действующих, сооружаемых и планируемых к сооружению объектов использования атомной энергии (плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», атомных ледоколов, лихтеровоза «Севморпуть», других планируемых объектов малой атомной энергетики, судов атомного технологического обслуживания, береговых хранилищ ОЯТ и РАО и т. п.).

Актуальность решения этой задачи связана в частности с возрастающей ролью Северного морского пути (СМП) в развитии экономики страны, которая определяется планируемым развитием промышленной, транспортной и оборонной инфраструктуры в прилегающих к СМП районах территории и акватории Арктической зоны России. Реализация этих амбициозных планов приведет к увеличению потребности в надежном и эффективном энергоснабжении, что потребует создания соответствующей генерирующей инфраструктуры.

На рис. 1 представлен ряд потенциальных потребителей электроэнергии в районах морских и прибрежных территорий Арктической и Дальневосточной зон Российской Федерации.

К этому можно добавить перспективные направления развития Северного широтного хода (рис. 2), что также предполагает возможное возникновение потребности в дополнительных надежных генерирующих мощностях.

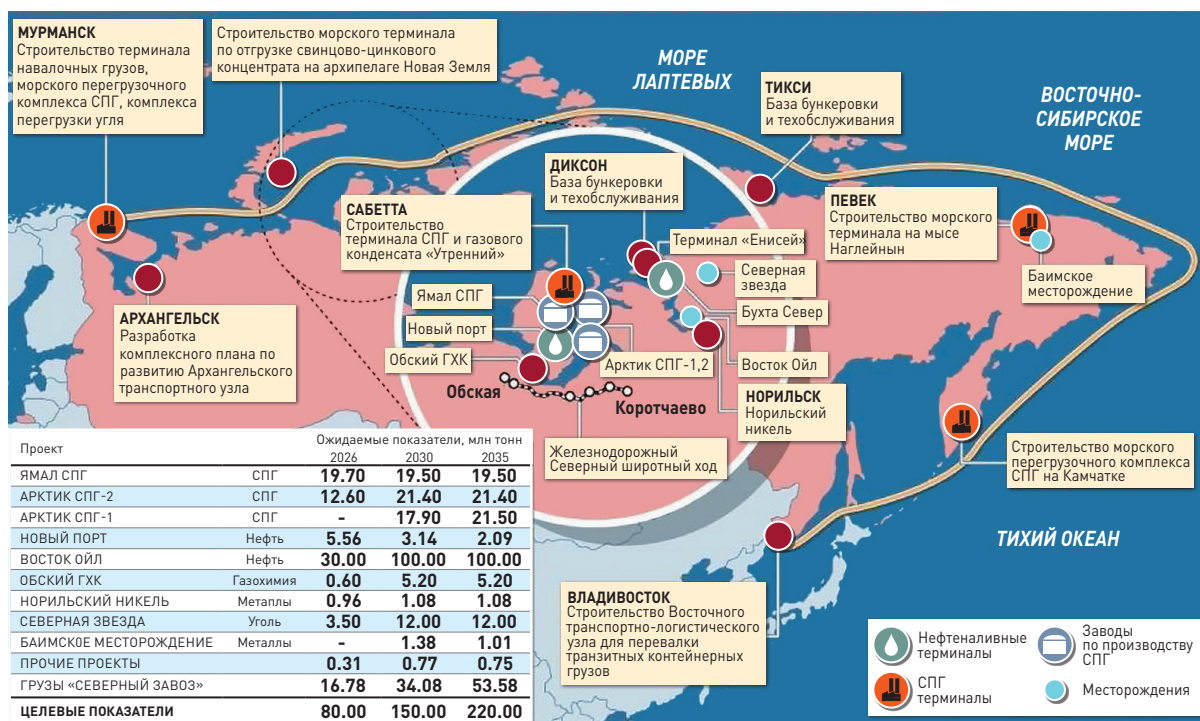


Рис. 1. План развития морских и прибрежных территорий Арктической и Дальневосточной зон Российской Федерации до 2035 г. [5]

Fig. 1. Development plan for marine and coastal territories of the RF Arctic and Far Eastern zones until 2035 [5]

В качестве источников энергоснабжения в арктическом регионе России наряду с другими рассматриваются и плавучие атомные теплоэлектростанции, транспортабельные модульные атомные станции малой мощности (АСММ) и другие объекты с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) малой мощности. Обязательным условием масштабного применения таких энергоисточников является обеспечение безопасности окружающей среды и населения в условиях роста количества объектов использования атомной энергии, их единичной мощности и суммарной доли в выработке энергии.

При обосновании безопасности ЯЭУ обычно используется консервативный подход, когда рассматриваются возможные последствия гипотетических событий, приводящих к максимально негативному воздействию на персонал, население и окружающую природную среду.

Масштаб негативных последствий гипотетических аварий на ЯЭУ определяется несколькими факторами:

- полной активностью радионуклидов, поступивших в окружающую среду в результате аварии;
- длительностью выхода радионуклидов из объекта;
- общей площадью загрязненной выше допустимого уровня территории (акватории);
- изотопным составом поступивших в окружающую среду радионуклидов;
- численностью населения, подвергшегося облучению в результате распространения радионуклидов в окружающей среде.

Оценка активности и изотопного состава накопившихся в ЯЭУ радионуклидов является, таким образом, первым шагом в исследовании ее безопасности.

С этой точки зрения максимальные негативные последствия могут наступить в случае аварии с возникновением самоподдерживающейся неконтролируемой цепной реакции (СЦР) в активной зоне (АЗ) ЯЭУ, в результате которой происходит выброс радионуклидов в атмосферу.

Во временном масштабе распространения радионуклидов в окружающей среде выход основного количества радионуклидов происходит практически мгновенно. Характерная скорость распространения примеси в атмосфере значительно выше, чем в других средах (вода, поверхность земли). Таким образом, при атмосферном выбросе в результате СЦР за короткий промежуток времени радиоактивному загрязнению подвергается более обширное пространство, чем при других условиях протекания гипотетической аварии.

На предыдущих этапах работы были исследованы последствия гипотетических аварий на ЯЭУ морского базирования при их нахождении вблизи самой западной (ФГУП «Атомфлот», Мурманск) и самой восточной (поселок Певек) точек побережья Арктической зоны России [7].

Методы исследований

Сценарии гипотетических аварий. Основные параметры реакторных установок (РУ) малой мощ-



Рис. 2. Перспективные направления развития Северного широтного хода [6]
 Fig. 2. Perspective development directions of the Northern Latitudinal Railway [6]

ности, эксплуатируемых и планируемых к эксплуатации в Арктике, приведены в табл. 1 [8; 9].

Имевшие место аварии с развитием СЦР на эксплуатирувавшихся транспортных ЯЭУ были так или иначе связаны с операциями обслуживания установок — выгрузкой и загрузкой ядерного топлива и ремонтом оборудования. Во всех случаях причиной возникновения СЦР являлись неисправность оборудования и/или ошибочные действия персонала.

Рассмотрим два примера таких аварийных ситуаций.

1. Авария на АПЛ К-140 проекта 667А (1968 г.) [10]. При нахождении на ПО «Севмашпредприятие» в Северодвинске при производстве работ с оборудованием ЯЭУ произошел несанкционированный и бесконтрольный выход ядерного реактора одного борта на запредельную мощность. Из-за неправильного монтажа сети резервного питания компенсирующих органов реактора левого борта (были перепутаны фазы) при подаче питания начался их самопроизвольный подъем. Освободилось до 12% реактивности. Поскольку все приборы на пульте управления реакторами были отключены, дежурная служба не обнаружила никаких внешних признаков аварии, хотя мощность, как показывают расчеты, в это время была почти в 20 раз выше но-

минальной, а давление в первом контуре доходило до 800 атм. Разгерметизации первого контура не произошло, что свидетельствует о прочности материала, хороших технологии и сварки. Радиационная обстановка в реакторном отсеке ухудшилась, но никто из обслуживающего персонала не пострадал. Паропроизводящая установка левого борта была выведена из строя.

2. Авария на АПЛ К-431 проекта 675 (1985 г.) [11]. Эта авария явилась крупнейшей в истории ВМФ СССР. Она произошла на атомной подводной лодке К-431 10 августа 1985 г. во время плановых работ на судоремонтном заводе в бухте Чажма вблизи Владивостока. После завершения работ по перегрузке ядерного топлива была обнаружена течь между крышкой и корпусом реактора. Для ее устранения требовалось заменить поврежденную прокладку между крышкой и корпусом, для чего реактор разгерметизируется и крышка реактора поднимается. При этом из-за неправильной установки специального устройства удержания штока компенсирующей решетки в нижнем положении произошел ее нерегламентированный подъем, приведший реактор в состояние мгновенной критичности. В результате произошел выброс радиоактивных веществ и ядерного топлива за пределы АПЛ, возникли сильные разрушения.

Таблица 1. Параметры РУ, эксплуатируемых и планируемых к эксплуатации в Арктике
Table 1. Parameters of the Nuclear Facilities Operated and Planned for Operation in the Arctic

Тип РУ	Мощность тепловая, МВт	КИУМ	Обогащение топлива, %	Топливная кампания, лет	Энерговыработка, ГВт·сут	Объекты
ОК-900А	171	0,6	40,6	5—6	84	Атомные ледоколы «Ямал» и «50 лет Победы»
КЛТ-40	135	0,3	40	10	78	Лихтеровоз «Севморпуть»
КЛТ-40С	150	0,65	20	3	137,5	ПАТЭС
РИТМ-200	175	0,65	17,5	4,57	291,7	Строительство головного и четырех серийных универсальных атомных ледоколов (УАЛ) проекта 22220 + АСММ. Три УАЛ — «Сибирь», «Арктика» и «Урал» — уже введены в строй
РИТМ-400	315					Строительство головного и одного серийного атомного ледоколов проекта «Лидер» + атомные контейнеровозы арктического класса
АБВ-6М	45	0,8	16,5	8	131,5	АСММ

Обратим внимание на то, что сценарии обеих аварий довольно схожи: в результате ошибочных действий персонала возникла СЦР. Однако значительный выход радиоактивных материалов за пределы реакторного отсека произошел только в условиях разгерметизированного реактора.

Таким образом, можно считать, что максимально негативные последствия происходят при аварии с развитием СЦР при открытой (незакрепленной) крышке реактора. Такая ситуация может возникать только в пунктах обслуживания и ремонта ЯЭУ, где производятся операции с активной зоной реакторной установки.

Единственной действующей сегодня ЯЭУ малой мощности, для которой заведомо будут проводиться операции по перегрузке ядерного топлива на месте эксплуатации, является ПАТЭС «Академик Ломоносов» на основе РУ КЛТ-40С.

Результаты исследований

Накопление радионуклидов в РУ КЛТ-40С. Для оценки активности выброса радионуклидов в атмосферу при гипотетической аварии с развитием СЦР в конце топливной кампании, когда радиационный потенциал в активной зоне реактора максимален, необходимо оценить накопление радионуклидов на этот момент. Накопление радионуклидов в ОЯТ определяется в первую очередь полной энерговыработкой реакторной установки за кампанию, степенью обогащения топлива ^{235}U и режимом работы реактора.

В работе [12] проведены оценки накопления радионуклидов в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) для ЯЭУ лихтеровоза «Севморпуть», принятой за прототип ЯЭУ ПАТЭС «Академик Ломоносов», — КЛТ-40С. Расчеты [8] соответствуют энерговыработке 30,8 ГВт·сут, причем расчеты были сделаны для работы реактора на постоянной мощности в течение около 1,5 лет. Подобный режим эксплуатации РУ характерен для атомных станций теплоэлектроснабжения, включая ПАТЭС, в отличие от транспортных ЯЭУ, где режим работы часто имеет циклический характер, обусловленный назначением кораблей и судов.

Наработка в ОЯТ продуктов деления с временем жизни порядка длительности топливной кампании в разумном приближении пропорциональна энерговыработке. В табл. 2 приведены оценки накопления продуктов деления в ОЯТ РУ КЛТ-40С, полученные на основе данных [10] с использованием параметров ЯЭУ из табл. 1.

Для оценки накопления актиноидов необходимо также учесть содержание ^{238}U в топливной композиции, т. е. фактически степень обогащения топлива ^{235}U , и режим работы реактора. Поскольку, как указано выше, данные по накоплению актиноидов в [8] получены для режима работы, характерного для реакторов ПАТЭС, эти данные также могут быть использованы для оценки накопления актиноидов в ОЯТ реактора КЛТ-40С за одну топливную кампанию. Необходимо лишь учесть, что из основных актиноидов нечувствительным к плотности энерго-

Таблица 2. Активность продуктов деления с периодом полураспада не менее двух лет, накопленных в ОЯТ РУ КЛТ-40С за одну топливную кампанию

Table 2. Activity of fission products with a half-life of at least two years accumulated in the spent nuclear fuel (SNF) of the KLT-40S nuclear facility during one fuel run

Нуклид	$T_{1/2}$	Активность, ПБк
⁸⁵ Kr	3934,4 дня	1,96
⁹⁰ Sr	28,78 года	16,95
¹³⁴ Cs	2,0648 года	7,14
¹³⁷ Cs+ ^{137m} Ba	30,07 года	33,01
¹⁴⁷ Pm	2,6934 года	49,08

выделения является только ²³⁸Pu, а для остальных трансурановых элементов скорость образования ядер примерно обратно пропорциональна плотности энерговыделения (практически степени обогащения топлива) в активной зоне [13]. Полученные результаты для актиноидов с периодом полураспада свыше двух лет приведены в табл. 3.

Таблица 3. Активность актиноидов с периодом полураспада не менее двух лет, накопленных в ОЯТ РУ КЛТ-40С за одну топливную кампанию

Table 3. Activity of actinides with a half-life of at least two years accumulated in the spent nuclear fuel (SNF) of the KLT-40S nuclear facility during one fuel run

Нуклид	$T_{1/2}$, лет	Активность, ПБк
²³⁸ Pu	87,7	0,02
²³⁹ Pu	24 060	0,01
²⁴⁰ Pu	6564	< 0,01
²⁴¹ Pu	14,35	0,58
²⁴¹ Am	432,2	< 0,01

Накопление продуктов активации происходит на протяжении всего периода эксплуатации ПАТЭС. За это время ее РУ отработают до 12 топливных кампаний.

Для расчета будем считать, что в течение трех топливных кампаний после полной перезагрузки реакторов и хранилищ свежего топлива в заводских условиях активация металлоконструкций и корпуса реактора происходит непрерывно с постоянным уровнем мощности, что соответствует энерговыработке 412,5 ГВт-сут. Затем ПАТЭС отправляется на завод для ремонтных и профилактических работ с остановленными реакторами для полной перезагрузки всего ОЯТ. После завершения этих работ ПАТЭС отправляется к месту эксплуатации в течение следующих трех топливных кампаний. Будем

считать, что в течение всего периода остановки реакторов с отработавшим или свежим топливом в активных зонах (приблизительно год) активации металлоконструкций не происходит. Такая схема эксплуатации из четырех описанных циклов может при расчете несколько завышать истинные активности продуктов активации, что вполне укладывается в концепцию консервативного подхода.

В [14] проведена оценка накопления продуктов активации, соответствующая энерговыработке около 70 ГВт-сут. При этом предполагалось, что активация происходит постоянно на некотором среднем уровне мощности. Таким образом, эти данные могут быть использованы для расчета накопления продуктов активации по описанной выше схеме.

Рассчитанные так активности продуктов активации с периодом полураспада не менее двух лет, накопленных в РУ КЛТ-40С в конце срока эксплуатации ПАТЭС приведены в табл. 4.

Таблица 4. Активность радионуклидов с периодом полураспада не менее двух лет в материалах конструкций ППУ РУ КЛТ-40С за 4 цикла по 3 топливных кампании

Table 4. Activity of radionuclides with a half-life of at least two years in construction materials of the steam generating system of the KLT-40S Reactor during 4 cycles 3 fuel runs each

Радионуклид	$T_{1/2}$, лет	Активность, Бк
⁵⁵ Fe	2,7	1,12E+17
⁶⁰ Co	5,23	2,73E+16
⁵⁹ Ni	75000	1,04E+14
⁶³ Ni	96,0	8,00E+15
⁹³ Mo	3500	5,94E+10
⁹⁹ Tc	213000	1,65E+10

Обсуждение

Оценки выброса накопленных радионуклидов в окружающую среду. Тепловой взрыв в результате возникшей СЦР при гипотетической аварии приводит к расплавлению части активной зоны и металлоконструкций реактора. Часть расплава в виде мелкодисперсных аэрозолей выбрасывается в атмосферу и в дальнейшем распространяется атмосферными течениями, постепенно оседая на подстилающую поверхность. Остальная часть расплава остается в корпусе реактора и в реакторном отсеке (помещении).

Количественные оценки доли активности, выброшенной в атмосферу, содержат значительные неопределенности.

Анализ радиоактивных следов выпавших на грунт радионуклидов в ближней от реактора зоне в результате Чернобыльской и Чажменской аварий дают оценку доли выброшенной топливной компо-

зиции в 3—4% общей массы топлива [11; 15]. При этом после Чажменской аварии в реакторе осталось 60—70% топлива в виде расплава в смеси с металлоконструкциями.

Учитывая, что Чажменская авария была вызвана СЦП со свежим топливом в АЗ, а рассматриваемые в данной статье оценки относятся к гипотетической СЦП в АЗ, полностью выработавшей свой энергоресурс (что уменьшит мощность СЦП), можно полагать, что в реакторе останется еще большая часть расплавленной топливной композиции.

Поэтому для предельно консервативных оценок можно принять для дальнейших расчетов величину выброса радионуклидов в окружающую среду, равную 20% накопленной активности.

Можно также отметить, что у реакторов двух-трех поколений компенсирующие органы сегментированы на несколько частей и управляются независимыми приводами. Хотя это не исключает полностью возможность возникновения СЦП во всем объеме активной зоны, но снижает вероятность такого события по сравнению с вероятностью локальной СЦП в части сегментов АЗ. Поэтому для умеренно консервативных оценок можно принять величину выброса радионуклидов в окружающую среду в 5% накопленной активности. При расчетах атмосферного переноса выброшенных из реактора радионуклидов необходимо будет учитывать фракционирование выброшенных аэрозолей.

Выводы

Выполнен анализ оценок накопления радионуклидов в ОЯТ и металлоконструкциях установленного на ПАТЭС реактора КЛТ-40С при возникновении СЦП при выгрузке топлива после завершения последней (до передачи ЯЭУ на утилизацию) топливной кампании. Оценки основаны на расчетных данных для реактора КЛТ-40, эксплуатировавшегося на лихтеровозе «Севморпуть» и являвшегося прототипом реактора КЛТ-40С. Отмечено, что вследствие соотношения длительности топливной кампании и проектного срока службы установки, аналогичной ПАТЭС «Академик Ломоносов», в реакторе будет накоплено большое количество продуктов активации. Выполнены консервативные оценки выхода радионуклидов в атмосферу в результате гипотетической аварии с возникновением СЦП при разгерметизированном реакторе. Полученные результаты будут использованы при анализе радиационных и радиологических последствий рассмотренной гипотетической аварии.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00615-П «Исследование радиоэкологических проблем Арктической зоны Российской Федерации с целью повышения радиационной и экологической безопасности человека и окружающей среды в условиях интенсивного использования морских и береговых ядерных энергетических установок для опережающего развития региона».

Благодарность

Авторы выражают признательность А. Е. Киселеву, В. Н. Семенову и Е. А. Долженкову за полезные обсуждения и рекомендации при написании настоящей статьи.

Литература/References

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. — Утв. указом Президента РФ от 5 марта 2020 г. № 164. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019?index=1>. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035 (approved by Decree of the President of the Russian Federation dated May 3, 2020 no. 164. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019?index=1>. (In Russian).
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Утв. указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033>. Development Strategy of the RF Arctic Zone and Provision of National Security for the Period up to 2035 (affirmed by the RF President decree dated October 26, 2020 no. 645). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202010260033>. (In Russian).
3. Единый план мероприятий по реализации Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года и Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. — Утв. распоряжением Правительства РФ от 15 апреля 2021 г. № 996-р в ред. распоряжения Правительства РФ от 13 мая 2022 г. № 1158-р). — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202104200007>. A unified action plan for the implementation of the fundamentals of the state policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035 and the Strategy for the development of the Arctic Zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035 (approved by Order of the Government of the Russian Federation dated April 15, 2021 No. 996-r as amended by Order of the Government of the Russian Federation dated May 5, 2022 no. 1158-p). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202104200007>. (In Russian).
4. План развития Северного морского пути до 2035 года. — Утв. распоряжением Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р). — URL: <http://static.government.ru/media/files/StA6ySKbBceANLRA6V2sF6wbOKSyxNzw.pdf>. The Northern Sea Route Development Plan up to 2035 (affirmed by the order of the RF Government dated August 1, 2022, no. 2115-r). Available at: <http://static.government.ru/media/files/StA6ySKbBceANLRA6V2sF6wbOKSyxNzw.pdf>.

government.ru/media/files/StA6ySKbBceANLRA6V2s-F6wbOKSyxNzw.pdf. (In Russian).

5. https://rosacademtrans.ru/wp-content/uploads/2022/08/4p_karta_sev_mor1_439.jpg.

6. <http://pro-arctic.ru/wp-content/uploads/2017/09/5828.jpg>.

7. Саркисов А. А., Антипов С. В., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А. и др. Радиационные и радиологические последствия гипотетической ядерной аварии на атомном объекте в районе расположения ФГУП «Атомфлот» // Атом. энергия. — 2022. — Т. 133, вып. 4. — С. 229—238.

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Vysotsky V. L., Pripachkin D. A. et al. Radiation and radiological consequences of a hypothetical nuclear accident at a nuclear facility positional-home district of Atomfлот. Atomic Energy, 2023, vol. 133, iss. 4, pp. 240—249. DOI: 10.1007/s10512-023-01003-5.

8. Саркисов А. А., Антипов С. В., Смоленцев Д. О. и др. Малая атомная энергетика в контексте трансформации электроэнергетических систем // Изв. вузов, сер. «Ядер. энергетика». — 2020. — № 4. — С. 5—14. — DOI: 10.26583/npe.2020.4.01.

Sarkisov A. A., Antipov S. V., Smolentsev D. O. et al. Low-power nuclear power plants in the context of electric power systems transformation. Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika, 2020, no. 4, pp. 5—14. DOI: 10.26583/npe.2020.4.01. (In Russian).

9. Наумов В. А., Гусак С. А., Наумов А. В. Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива // Изв. вузов, сер. «Ядерная энергетика». — 2018. — № 1. — С. 75—84. — DOI: 10.26583/npe.2018.1.08.

Naumov V. A., Gusak S. A., Naumov A. V. Small Nuclear Power Plants for Power Supply to the Arctic Regions: Spent Nuclear Fuel Radioactivity Assessment. Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika, 2018, no. 1, pp. 75—86. Available at: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.08>. (In Russian).

10. <http://www.deepstorm.ru/DeepStorm.files/45-92/nbrs/667AM/k140/k140.htm>.

11. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий // Вестн. Рос. акад. наук. — 2018. — Т. 88, № 7. — С. 599—618. — DOI: 10.31857/S086958730000083-9.

Sarkisov A. A., Vysotskii V. L. The nuclear accident aboard a nuclear submarine in Chazhma bay: event recon-

struction and analysis of the consequences. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2018, vol. 88, no. 4, pp. 254—271. DOI: 10.1134/S1019331618040068.

12. Хойбраден С. Оценка риска для выведенных из эксплуатации атомных подводных лодок с невыгруженным топливом // Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок. Международный научный семинар / Под ред. А. А. Саркисова и Алана Турниоль дю Кло. — М.: КомТех, 1999. — С. 84—102.

Høibraten S. Risk assessments for non-defuelled, decommissioned nuclear submarines // Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal. Ed. by Ashot A. Sarkisov and Alain Tourniol du Clos. Dordrecht / Boston / London, Kluwer Academic Publ., 1999, pp. 53—64.

13. Бартоломей Г. Г., Бать Г. А., Байбаков В. Д. и др. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Под ред. Г. А. Батя. — М.: Энергоиздат, 1982. — 511 с.

Bartolomei G. G., Bat' G. A., Baibakov V. D. et al. Theory principles and design methods for nuclear power reactors. Ed. by G. A. Bat'. Moscow, Energoizdat, 1982, p. 511. (In Russian).

14. Езовит Э. С., Мазокин В. А., Нетеча М. Е., Орлов Ю. В. Радиационные факторы, определяющие безопасность при обращении с реакторными отсеками в период снятия с эксплуатации атомных подводных лодок // Проблемы вывода из эксплуатации и утилизация атомных подводных лодок. Международный научный семинар / Под ред. А. А. Саркисова. — М.: КомТех, 1999. — С. 372—380.

Mazokin V. A., Netecha M. Ye., Orlov Yu. V., Yezovit E. S. Radiation Factors Determining the Safety of Handling Reactor Compartments when Decommissioning Nuclear Submarines. Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems. Ed. by L. G. LeSage and A. A. Sarkisov. Dordrecht / Boston / London, Kluwer Academic Publ., 1996, pp. 277—288.

15. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия: Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (25—29 августа 1986 г., Вена). [Б. М.]: ГКИАЭ, август 1986 г.

Accident at the Chernobyl NPP and its consequences // Information prepared for IAEA exprt meeting (August 25—29, 1986, Wien). GKIAE (State Committee for Usage of Nuclear Energy), 1986. (In Russian).

Информация об авторах

Антипов Сергей Викторович, доктор технических наук, заместитель директора, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Билашенко Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: bilvp@ibrae.ac.ru.

Кобринский Михаил Натанович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, ИБРАЭ РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: mnk@ibrae.ac.ru.

ACTIVITY AND ISOTOPIC COMPOSITION OF RADIONUCLIDES ACCUMULATED IN THE FNPP REACTORS DURING THE FULL LIFECYCLE

Antipov, S. V., Bilashenko, V. P., Kobrinsky, M. N.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

The article was received on December 28, 2023

For citing

Antipov S. V., Bilashenko V. P., Kobrinsky M. N. Activity and isotopic composition of radionuclides accumulated in the FNPP reactors during the full lifecycle. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 4—11. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-4-11. (In Russian).

Abstract

The authors have estimated the activity and composition of radionuclides accumulated in the reactors of the floating nuclear thermal power plant (FNPP) upon completion of the last fuel run. An analysis of the previously occurred criticality events at transport nuclear power facilities has shown that the most harmful consequences for the population and environment arise due to the self-sustain chain reaction (SCR) with depressurized reactor. Such an event can occur at a floating nuclear power plant (FNPP). The researchers have obtained estimates for the KLT-40S reactor using the calculation for the KLT-40 reactor. They have taken into account the design-base power production, fuel enrichment, as well as the FNPP service life.

Keywords: Arctic zone of the RF, Northern Sea Route, floating nuclear thermal power plant (FNPP), radiation safety, anthropogenic radionuclides, radionuclide accumulation.

Funding

The work is supported by the Russian Science Foundation grant No. 2019-00615-P “Research into Radioecological Problems of the Russian Arctic in Order to Enhance Radiation and Ecological Safety of Humans and Environment when Intensively Using Offshore and Onshore Nuclear Power Plants for the Region Advanced Development”.

Acknowledgements

The authors are grateful to A. E. Kiselev, V. N. Smirnov, and E. A. Dolzhenkov for useful discussions and recommendations when writing the paper.

Information about the authors

Antipov, Sergey Victorovich, Doctor of Engineering, Deputy Director, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: santipov@ibrae.ac.ru.

Bilashenko, Vyacheslav Petrovich, PhD of Engineering, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: bilvp@ibrae.ac.ru.

Kobrinsky, Mikhail Natanovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tuskaya Str., Moscow, Russia, 115191), e-mail: mnk@ibrae.ac.ru.

© Antipov S. V., Bilashenko V. P., Kobrinsky M. N., 2024