

БЕЗОПАСНОЕ РАЗВИТИЕ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРКТИКЕ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ПОДХОДЫ

**А.А. Саркисов, С.В. Антипов, Д.О. Смоленцев, В.П. Биладенко,
М.Н. Кобринский, В.А. Сотников, П.А. Шведов**

*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук*

115191, Россия, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52



Потребности в использовании атомных энергетических технологий в Арктике для решения социально-экономических проблем государства могут быть удовлетворены только при условии определения стратегии безопасного обращения с ними на всех этапах от разработки до вывода из эксплуатации, развития методических подходов и математических моделей для прогнозирования и минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду в случае аварий на этих объектах и применения полученных результатов в научно обоснованной системе поддержки принятия решений по ликвидации последствий таких аварий. Особая актуальность этого требования определяется уникальностью природного ландшафта и ролью Арктического региона в формировании климатических и гидрологических процессов в Мировом океане. Представлены основные итоги и обобщенные выводы анализа радиологических последствий масштабного использования атомной энергетики в интересах экономического развития Арктического региона, полученные в рамках комплексного исследования по теме «Разработка методических подходов и математических моделей для прогнозирования воздействия на окружающую среду в случае аварий на атомных плавучих объектах, моделирование распространения радиации в Арктической акватории при аварийных ситуациях». Возрастающие потребности в атомных энергоисточниках малой мощности для целей развития удаленных регионов, их экономические и технологические преимущества, а также минимальные возможные экологические последствия в случае гипотетических аварий являются причиной качественного изменения отношения к их использованию. Выполнена оценка масштаба использования атомной энергии и результаты компьютерного моделирования распространения активности в акватории в случае реализации аварийных ситуаций. Сделан вывод о необходимости выбора стратегии развития атомных энергоисточников малых мощностей, основанной на реализации модульного принципа их конструирования.

Ключевые слова: Арктика, атомный ледокольный флот, атомные станции малой мощности, прогноз развития, радиационная безопасность, морские акватории, математическое моделирование.

© А.А. Саркисов, С.В. Антипов, Д.О. Смоленцев, В.П. Биладенко, М.Н. Кобринский, В.А. Сотников, П.А. Шведов, 2018

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МАЛЫХ МОЩНОСТЕЙ

С ростом потребностей мировой экономики в освоении природных ресурсов в удаленных, изолированных и малонаселенных районах возрастает спрос на автономные надежные, экологически безопасные и экономически эффективные энергоисточники. В качестве таких источников для целей электро- и теплоснабжения, а также для технологических нужд будут востребованы атомные установки малой мощности. В ряде стран с развитой атомной энергетикой предпринимаются практические шаги и разворачиваются масштабные работы по созданию реакторов малой мощности для применения в самых разных целях.

В рамках реализации плана мероприятий государственных программ «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», «Развитие судостроения на 2013 – 2030 годы» и «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» предполагается масштабная разработка и внедрение атомных энергетических технологий гражданского применения в Арктическом регионе России. К ним прежде всего относятся атомные ледоколы нового поколения, транспортабельные модульные атомные станции малой мощности (АСММ), атомные теплоэлектростанции, подводные АСММ для энергоснабжения шельфовых комплексов нефте- и газодобычи, атомные энергоисточники для энергоснабжения объектов обеспечения морской и авионавигации вдоль трассы Северного морского пути, другие специальные объекты обустройства прибрежных северных территорий.

Очевидно, что в ближайшей перспективе одной из основ транспортного и энергетического секторов Арктического региона будут являться уже освоенные или находящиеся на стадии разработки проекты атомных энергоисточников. На сегодняшний день это означает большое разнообразие их типов и конструкций. Эффективность такого сценария развития атомной энергетике малых мощностей далека от оптимальной, так как усложняется их эксплуатация и требуется создание соответствующей инфраструктуры.

Современные требования к развитию конкурентоспособной малой атомной энергетике состоят в необходимости серийного изготовления энергоустановок и централизации инфраструктуры обращения с ними (капитальные ремонты, обращение с радиоактивными отходами (РАО) и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), вывод из эксплуатации и т.д.) [1 – 3], которые позволят унифицировать цепочки технологических процессов и снизить стоимость владения объектом генерации при масштабном развитии направления. Систематизация типов и характеристик используемых и планируемых к использованию в Арктике атомных энергоисточников, применяемых технологий обращения с ними, а также количественная оценка воздействия на окружающую среду в случае возможных аварийных ситуаций приводят к необходимости выбора такой стратегии развития атомных энергоисточников малых мощностей, которая основана на реализации модульного принципа их конструирования, предусматривающего возможность создания установок различных мощностей за счет комплектования однотипных блоков.

В этом ключе в качестве приоритетных проектов целесообразно рассматривать модульные транспортабельные атомные энергоисточники с высокой степенью заводской готовности.

В настоящее время картина использования атомных энергетических установок в Арктике и перспективы выглядят так.

ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА С ЯЭУ

В строю находятся четыре атомных ледокола: два ледокола проекта 10521 («Ямал», «50 лет Победы» с двумя атомными паропроизводящими установками

(АППУ ОК-900А), два мелкосидящих ледокола проекта 10580 («Таймыр», «Вайгач» с одной АППУ КЛТ-40М). С учетом возможного продления ресурса ЯЭУ к 2025 – 2026 гг. из эксплуатации будут выведены три из ныне действующих ледоколов, к 2030 г. в строю останется только ледокол «50 лет Победы». В целях обеспечения государственных задач по осуществлению проводок грузовых судов по Северному морскому пути планируется качественное обновление атомного ледокольного флота [4 – 7]. Для сохранения функций и расширения задач ледокольного флота на Балтийском заводе ведется строительство серии трех универсальных атомных ледоколов проекта 22220: «Арктика» (спуск на воду состоялся в июне 2016 г., ввод в эксплуатацию запланирован на 2019 г.), «Сибирь» (спуск на воду состоялся в сентябре 2017 г., ввод в эксплуатацию запланирован на 2020 г.), «Урал» (заложен в июле 2016 г., ввод в эксплуатацию запланирован на 2021 г.). В составе АППУ ледоколов этого проекта будет две реакторных установки (РУ) РИТМ-200.

Идет поиск инвесторов и прорабатываются проекты строительства в долгосрочной перспективе до 2030 г.:

- двух (в дополнение к трем, указанным выше) универсальных атомных ледоколов проекта 22220;
- ледокола-лидера для круглогодичной навигации с двумя АППУ РИТМ-400;
- multifunctional атомного ледокола оффшорного типа для задач освоения шельфа с АППУ РИТМ-200Б.

Кроме ледоколов находится в эксплуатации единственное ледокольно-транспортное судно – атомный лихтеровоз «Севморпуть» с АППУ КЛТ-40.

ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ АТОМНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

По оценкам NEA OECD и МАГАТЭ, к 2035 г. установленная мощность АСММ в мире достигнет 21 ГВт. В Арктическом регионе России для обеспечения развития социальной и промышленной инфраструктуры до 2030 г. потребуются ввод от 2-х до 10-ти ГВт (эл.) новых мощностей, доля атомных энергоисточников при комплексном развитии этого направления будет достигать 30%.

В высокой стадии реализации находится плавучий энергоблок проекта 20870 с двумя РУ КЛТ-40С (ПАТЭС). В ближайшее время ожидается начало опытной эксплуатации. Местом размещения головной станции выбран г. Певек Чукотского АО, начало эксплуатации синхронизировано с выводом из эксплуатации Билибинской АЭС и запланировано на 2019 г. С учетом проектных особенностей ПАТЭС (заводской ремонт после первых двух эксплуатационных циклов по 12 лет) для обеспечения непрерывного энергоснабжения в целевом регионе необходимо строительство серии электростанций данного типа. Таким образом, после отработки технологии в реальных эксплуатационных условиях до 2030 г. можно ожидать сооружение еще одной – двух ПАТЭС, оптимизированных по стоимости по сравнению с головной станцией для достижения конкурентоспособности.

Для энергоснабжения прибрежных, а также удаленных от морских акваторий потребителей целесообразно использовать транспортабельные модульные АСММ с единичной мощностью до 10 МВт (эл.). Такими разработками с наибольшей степенью обоснования технико-экономической модели их применения являются АСММ типа «Шельф», представленные семейством атомных энергоисточников различных конфигураций на базе унифицированной РУ «Шельф» мощностью 6.4 МВт (эл.) наземного исполнения. Другой перспективный тип АСММ представлен проектами на базе РУ АБВ-6Э мощностью 12 МВт (тепл.) плюс 6 МВт (эл.) наземного исполнения или в составе плавучего энергоблока. Решение о старте этих проектов еще не принято,

но учитывая динамику их развития и реальную потребность, можно ожидать начало работ по созданию головных образцов в ближайшие три – пять лет. Ориентировочный срок реализации проектов с момента первых инвестиций ограничен снизу разработкой топлива и составляет около шести – восьми лет.

По сообщениям в прессе (например, [8]), реализуются проекты Минобороны по созданию атомных энергоисточников малой мощности. По состоянию на август 2017 г. ведутся переговоры с инвестором по созданию головных образцов энергоустановок мощностью 1 МВт (эл.) и 100 кВт (эл.) для энергообеспечения единичных удаленных потребителей. Целевыми объектами применения этих станций в Арктике могут являться метеорологические и гидрологические станции и посты, научно-исследовательские базы, радиолокационные станции, аэродромы как военного, так и гражданского назначения. Необслуживаемая АСММ мегаваттного класса будет базироваться на тягачах и полуприцепах, которые могут транспортироваться водным путем. Описание проекта в открытых источниках пока недоступно, наиболее близкими по мощности [8] являются АСММ с газоохлаждаемой РУ «АТГОР» и АСММ на базе водо-водяной РУ «Витязь» разработки АО «НИКИЭТ».

Прототипами необслуживаемых атомных энергоисточников с технологией прямого преобразования ядерной энергии в электрическую (до 100 кВт (эл.)) являются реакторы прямого преобразования энергии, которые использовались для энергоснабжения аппаратуры космических аппаратов, опытнодемонстрационная ядерная термоэлектрическая установка «Гамма» мощностью 6.6 кВт (эл.) и атомная термоэлектрическая станция «Елена» мощностью 68 кВт (эл.) (технический проект), а также РИТЭГИ (~ 0.3 кВт (эл.)), ранее применявшиеся в навигационных маяках, радиомаяках, метеостанциях. Ожидаемый срок реализации пилотных проектов энергоустановок мощностью порядка 1 МВт (эл.) и 100 кВт (эл.), при условии начала инвестирования в 2017 – 2018 гг., предварительно назначен на 2023 г. [8].

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АСММ В АРКТИКЕ

В отличие от атомных энергетических технологий в судостроении масштаб применения атомных энергоисточников малой мощности определяется их конкурентоспособностью (по совокупным затратам и себестоимости вырабатываемой энергии) по сравнению с прочими видами энергоснабжения. Проведенный технико-экономический анализ вариантов использования АСММ в Арктике показал относительную эффективность некоторых проектов [1, 7, 9 – 14].

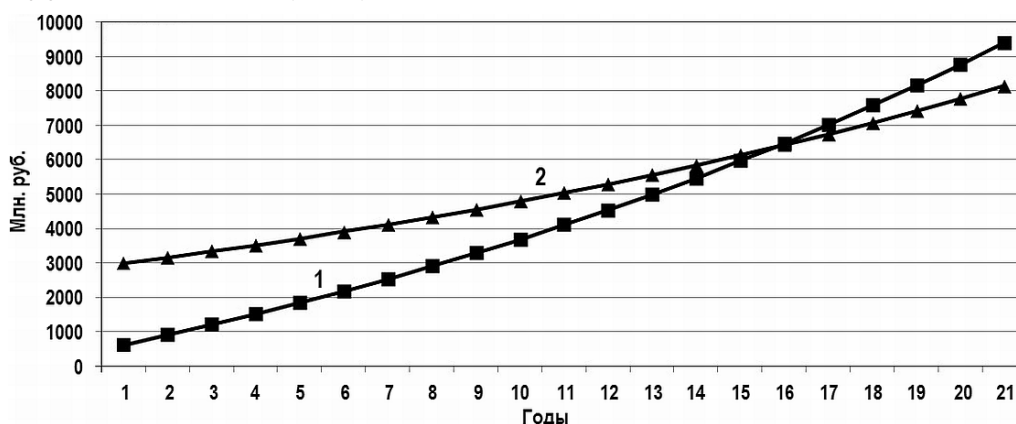


Рис. 1. Накопленные интегральные затраты по годам эксплуатации энергоустановок мегаваттного класса в Арктике: 1 – ДЭС 1 МВт; 2 – атомный энергоисточник 1 МВт

Несмотря на относительно высокие удельные капиталовложения (КВЛ) (напри-

мер, удельные КВЛ в атомный энергоисточник мощностью порядка 1 и 5 МВт (эл.) оцениваются в 3 и 1 млн. руб./кВт соответственно), интегральные затраты АСММ ввиду отсутствия или значительного сокращения стоимости топливного обеспечения растут медленнее по сравнению с традиционными энергоисточниками, эксплуатируемыми на целевых площадках (ДЭС, ПГУ, ТЭЦ на угле), что в итоге отражается на нормированной стоимости электроэнергии (рис. 1, 2).

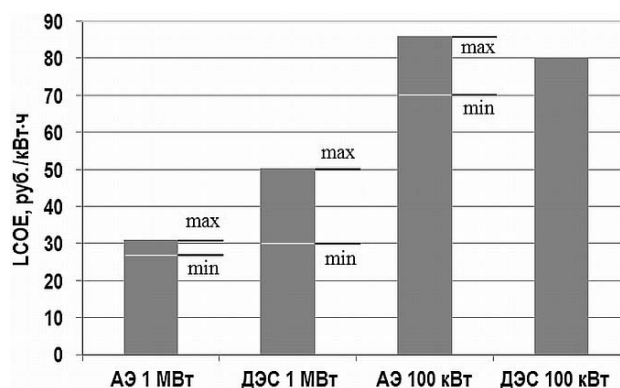


Рис. 2. Оценка Levelised Cost of Energy (LCOE – нормированная стоимость электроэнергии) энергоустановок мегаваттного класса в Арктике (АЭ – атомный энергоисточник)

Драйверами снижения стоимости основной продукции АСММ – электроэнергии, определяющими их конкурентоспособность, является модульная компоновка и серийное производство. На рисунке 3 представлены оценки снижения LCOE АСММ при серийном производстве.

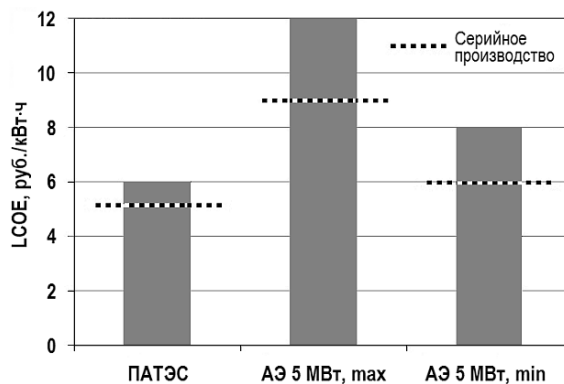


Рис. 3. Оценка LCOE АСММ при серийном производстве (АЭ – атомный энергоисточник)

Учитывая относительную конкурентоспособность АСММ для целевых районов применения Арктики, в среднесрочной перспективе можно ожидать увеличение масштабов их использования. В таблице 1 сведены прогнозные данные по использованию атомных энергетических установок в целях развития Арктического региона с учетом возможностей промышленности и необходимости создания обслуживающей инфраструктуры, экономической эффективности, а также некоторые известные параметры РУ, которые могут использоваться в последующих этапах работы при проведении сценарного моделирования и оценке рисков реализации аварийных ситуаций.

Представленный материал наглядно иллюстрирует приведенное в начале статьи утверждение о большом разнообразии типов и конструкций атомных энергоисточников, которое усложняет их эксплуатацию и увеличивает расходы на всем жизненном цикле. Это приводит к выводу о целесообразности рассмотрения в при-

НАИМЕНОВАНИЕ РАЗДЕЛА

оритетном порядке унифицированных проектов модульных атомных энергоисточников с высокой степенью заводской готовности.

Таблица 1

Параметры реакторных установок, эксплуатируемых (планируемых к эксплуатации) в Арктике

Тип РУ	РУ в эксплуатации (прогноз)		Компоновка *)	Мощность тепл., МВт	Топливо	Обогащение топлива, %	Топливная кампания, лет	Масса загрузки ²³⁵ U, кг
	2020 г.	2030 г.						
ОК-900А	4	2	1	171	Интерметаллид	≥ 40	5 – 6	207
КЛТ-40М	2	0	1	171	Интерметаллид	≥ 89	10	до 200
КЛТ-40	1	0	1	135	Интерметаллид	≥ 89	10	151
РИТМ-200	4	10	2	175	Металлокерамика	≤ 20	7 (10–12)	438
РИТМ-200Б	0	1	2	209	Унификация с РУ РИТМ-200			
РИТМ-400	0	2	2	315				
КЛТ-40С	2	4 – 6	1	150	UO ₂	≤ 20	3	290
АБВ-6М	0	1 – 2	2	38	UO ₂	≤ 20	10 – 12	190
Шельф			2	28	Интерметаллид	≤ 20	4 – 6	–
Витязь	0	1 – 4	2	6	–	≤ 20	6	–
АТГОР			2	3.5			10	

*) 1 – блочная; 2 – интегрированная

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АСММ В АРКТИКЕ

Перенос наиболее ядерно- и радиационно опасных операций, связанных с ремонтом, перегрузкой топлива, выводом из эксплуатации, с площадки размещения в специализированные заводские цеха позволит обеспечить высокий уровень безопасности и качества выполняемых процедур, минимизирует экологические последствия для окружающей среды [1, 2].

Основным способом доставки модулей атомных энергоисточников малой мощности, а также топлива (в том числе ОЯТ) в районы их эксплуатации или к объектам централизованной инфраструктуры является буксировка или перевозка Северным морским путем. Транспортировка некоторых энергоисточников (кроме необслуживаемых) планируется совместно с комплектами активных зон для последующих перегрузок. Например, на борту буксируемой ПАТЭС будет находиться четыре комплекта активных зон для каждой РУ, а также хранилище ОЯТ для обратной транспортировки. До доставки атомных энергоисточников малой мощности к месту их эксплуатации будут проводиться заводские испытания (швартовочные испытания, загрузка топлива, физпуск, пробная эксплуатация, останов). Для соблюдения правовых режимов РУ будут доставляться в «холодном» виде после консервации. Таким образом, помимо активных зон в момент транспортировки с расхоленным реактором конструктивные элементы РУ будут содержать накопленную за время проведе-

ния испытаний активность. При возврате же после эксплуатационной кампании на завод эта активность будет значительно выше. Поэтому необходим всесторонний анализ безопасности объектов на всех стадиях их жизненного цикла.

В качестве основных событий для ПЭБ и атомных ледоколов рассматриваются навигационные аварии (с возможным выходом радионуклидов в окружающую среду при разрыве трубопровода, повреждении хранилищ отработавших тепловыделяющих сборок и твердых радиоактивных отходов): таран другим судном, затопление на мелкой и глубокой воде, посадка на мель, которые относятся к запроектным авариям с вероятностью менее 10^{-6} год $^{-1}$ [7, 15].

Тем не менее, для обоснования безопасности транспортируемых объектов необходимо также рассмотреть последствия длительного нахождения их на дне в случае возможного аварийного затопления. Это необходимо также и потому, что ведется проработка проектов подводных капсульных АСММ: проект «Айсберг», подводная установка типа «Шельф», погружной энергетический модуль с РУ СВНР на основе реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Исследования по теме «Разработка методических подходов и математических моделей для прогнозирования воздействия на окружающую среду в случае аварий на атомных плавучих объектах, моделирование распространения радиации в Арктической акватории при аварийных ситуациях», выполняемые коллективом ИБРАЭ РАН, должны внести свой вклад в обеспечение научно обоснованной оценки уровня угрозы и рисков при принятии решений по развитию данного направления.

При проведении исследований и оценке рисков воздействия на окружающую среду в случае затопления ядерно- и радиационно опасных объектов в качестве модельных рассматривались находящиеся на дне Северного Ледовитого океана затопленные в 1960 – 1970-е гг. в Карском море реакторы, реакторные отсеки АПЛ и экранная сборка реактора ледокола «Ленин» [16]. Были разработаны и применены модель и программные решения для оценки времени предполагаемого коррозионного разрушения защитных барьеров таких объектов [17]. В качестве исходной информации учитывались данные об эшелонированной системе защиты (защитная оболочка, граница контура теплоносителя, оболочки твэлов, топливная композиция), накопленной активности, габаритных размерах и конструкционных материалах, соответствующих затопленному объекту. При этом алгоритм расчета коррозионного разрушения защитных барьеров для простых объектов (парогенераторы, корпуса и крышки реакторов и пр.) сводился к расчету времени появления сквозных отверстий и полному растворению объектов, для сложных (герметичные реакторы и реакторные отсеки) – к анализу возможных путей поступления морской воды и поэтапному коррозионному разрушению всех встречающихся на пути барьеров [16 – 19]. Количественная оценка последствий нахождения объекта на морском дне основана на моделировании каждого из этапов деградации: коррозионный процесс – поступление радионуклидов в морскую среду – распространение радиоактивности и изотопный состав загрязнения.

Было показано, что скорость выхода радионуклидов за пределы корродирующего материала, поступления их в окружающую среду и распространения в ней описывается следующими уравнениями [17]:

$$Q(t) = \frac{Smv}{V_0} \sum_i^l q_i(0) f(t) \exp(-\lambda_i t),$$

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right]\right\},$$

$$\sigma_i(x) = \sqrt{2k_i t} = \sqrt{2k_i x / U}, \quad i = y, z$$

при граничных условиях

$$\begin{cases} C = 0 & \text{при } t = 0, \\ C = 0 & \text{при } t = -\infty, \\ \partial C / \partial y = 0 & \text{при } y = 0, \end{cases}$$

где t – время коррозии, лет; $Q(t)$ – скорость выхода радионуклидов в морскую воду, Бк/год; S – площадь поверхности корродирующего материала, m^2 ; m – масса корродирующего материала, г; v – скорость коррозии, мм/год; V_0 – начальный объем корродирующего материала, m^3 ; λ_i – постоянная распада i -го нуклида, $год^{-1}$; l – число рассматриваемых нуклидов; $q_i(0)$ – удельная активность i -го нуклида в момент затопления ($t = 0$), Бк/г; $f(t)$ – функция, учитывающая изменение активности на корродирующей поверхности за счет неравномерного распределения активности по толщине конструкционного элемента, например, корпуса или крышки реактора; C – объемная активность в точке с координатами (x, y, z) , Бк/ m^3 ; U – скорость течения по оси x , м/с; k_y, k_z – коэффициенты турбулентной диффузии, $m^2/с$; σ – дисперсия в поперечных направлениях, м; ось z направлена от дна к поверхности, а оси x, y, z образуют правую систему координат.

Результаты исследований показали, что в случае нахождения объекта на дне выход радионуклидов в морскую среду из-за коррозионного разрушения защитных барьеров может произойти не ранее чем через 300 – 400 лет. За это время могут и должны быть найдены и реализованы способы подъема и приведения в безопасное состояние ядерно-опасных объектов, находящихся на морском дне.

В случае выхода радионуклидов в морскую среду произойдет повышение содержания техногенных радионуклидов в донных отложениях вблизи затопленных объектов по сравнению с фоном. Однако концентрация радиоактивных веществ на удалении более 1000 м от источника не будет существенно отличаться от концентраций, обусловленных глобальными выпадениями (рис. 4) [17].

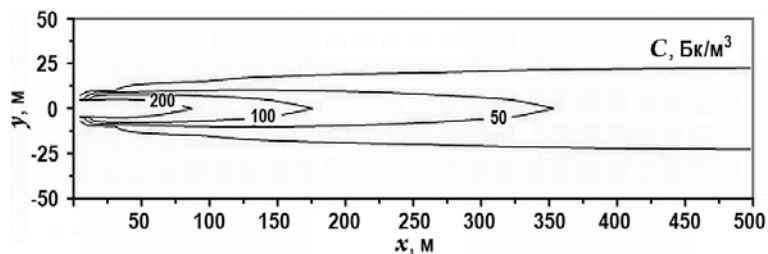


Рис. 4. Изолинии концентрации радионуклидов в морской воде через один год после разгерметизации источника. Источник в начале координат

Результаты компьютерного моделирования распространения активности в акватории для случая максимально возможного залпового выброса или длительно-го истечения за пределы защитных барьеров в окружающую среду для разных сценариев, вплоть до полного разрушения реактора и топливных сборок, проведенного с использованием совместной модели морской динамики и переноса частиц на базе модели динамики океана ИВМ-ИО [20], показали, что при максимальных гипотетических авариях районы радиоактивного загрязнения морской воды ^{137}Cs с превышением допустимой по российским нормам концентрации локализируются вблизи мест затопления ядерных объектов. Наибольшие концентрации ^{137}Cs в морской воде будут отмечаться на начальном этапе (до 20-ти суток после аварии) на удалении до 10 – 20 км от источника. Содержание ^{137}Cs в этой акватории может достигать 0.1 – 10 допустимой концентрации. В течение одного – двух месяцев концентрация радионуклида в результате его рассеяния (диффузии) в этих областях понизится и через три месяца станет сопоставима с фоном.

Разработанные модели и программные решения вносят вклад в развитие представлений о безопасности затопленных объектов, поскольку моделирование может рассматриваться как способ предупреждения аварийных ситуаций и оценки их последствий для морских систем. Разработанные программы позволяют получить оперативную оценку опасности объекта и уже после этого принимать решение о необходимости или нецелесообразности привлечения дополнительных вычислительных, финансовых и человеческих ресурсов для детального анализа рисков. Вышеупомянутые математические модели и программные комплексы могут быть распространены на любые объекты морского базирования, создающие угрозу возникновения аварийных ситуаций [17].

ВЫВОДЫ

Учитывая возросшие потребности в атомных энергоисточниках малой мощности для целей развития удаленных регионов, отмеченные выше их экономические и технологические преимущества, а также минимальные возможные экологические последствия в случае гипотетических аварий, можно ожидать качественного изменения отношения к их использованию. При оптимистичном сценарии развития (см. табл. 1) атомных энергетических технологий в Арктике к 2030 г. будет эксплуатироваться до 26-ти РУ в составе АППУ ледоколов, плавучих и наземных электростанций. Количество транспортируемых и находящихся в работе активных зон будет исчисляться десятками. Такой масштаб использования атомной энергии возможен только при условии опережающего развития сопутствующей инфраструктуры, в том числе в части обеспечения безопасности и защиты персонала, населения, окружающей среды в случае отклонения от нормальных режимов эксплуатации радиационно опасных объектов и попадания радиоактивных материалов в Арктические акватории. В подтверждение актуальности темы отметим, что утвержденные за время подготовки статьи «Общие положения обеспечения безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами» (НП-022-17) в части мер по обеспечению безопасности (уровень 5 Противоаварийное планирование) предусматривают проведение реалистического (неконсервативного) анализа запроектных аварий, содержащего оценки вероятностей путей протекания и последствий запроектных аварий для составления планов мероприятий по защите работников и населения в случае аварий [21].

Систематизация типов и характеристик, используемых и планируемых к использованию в Арктике атомных энергоисточников, применяемых технологий обращения с ними, а также количественная оценка воздействия на окружающую среду в случае возможных аварийных ситуаций приводят к выводу о необходимости выбора такой стратегии развития атомных энергоисточников малых мощностей, которая основана на реализации модульного принципа их конструирования, предусматривающего возможность создания установок различных мощностей за счет комплектования однотипных блоков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01674).

Литература

1. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: Т. 2 / Под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. – М.: Академ-Принт, 2015. – 387 с. – ISBN 978-5-906324-04-7 Электронный ресурс: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1930389 (дата обращения 07.02.2018).
2. Саркисов А.А. Вступительная статья председателя Программного комитета конференции «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики». – М.: Наука, 2011. – Т. 1. – С. 7-12.

3. История атомной энергетики Советского Союза и России: Сб. статей. – Вып. 1–5. – Вып. 5: История малой атомной энергетики. / Под ред. В.А. Сидоренко. РНЦ «Курчатовский институт». – М.: ИздАТ, 2004. – 168 с.
4. Рукша В.В., Головинский С.А., Белкин М.С. Ледокольное обеспечение крупнейших национальных арктических углеводородных проектов // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 4(24). – С. 109-113.
5. Кашка М.М., Смирнов А.А., Головинский С.А., Воробьев В.М., Рыжков А.В., Бабиц Е.М. Перспективы развития атомного ледокольного флота // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 3(23). – С. 98-107.
6. АО «ОКБМ Африкантов». Реакторные установки для атомных ледоколов и оптимизированных плавучих энергоблоков. Электронный ресурс: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/ritm-200_extended_ru_web.pdf (дата обращения 07.02.2018).
7. Кудинович И.В. Атомные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения и обоснование их безопасности / Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – СПб: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. – 292 с.
8. Малогабаритные атомные батареи для Арктики планируется создать в интересах МО к 2023 году // Электронный ресурс: <http://tass.ru/armiya-i-opk/4508435> (дата обращения 07.02.2018).
9. Саркисов А.А., Смоленцев Д.О., Антипов С.В., Билашенко В.П., Шведов П.А. Экономическая эффективность и возможности применения атомных энергоисточников мегаваттного класса в Арктике // Арктика: экология и экономика. – 2018. – № 1 (29). – С. 4-14.
10. Никитин В.С., Половинкин В.Н., Симонов Ю.А., Устинов В.С., Кузнецов В.П., Макаров В.И. Атомная энергетика в арктическом регионе // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 4 (20). – С. 8695.
11. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 3 (7). – С. 22-29.
12. Заседание Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам надёжности и безопасности больших систем энергетики Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике на тему «Возможности применения АЭС малой мощности для энергоснабжения гражданских потребителей» // Вести в электроэнергетике. – 2016. – № 6 (86). – С. 36-44.
13. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment. – [S. l.]: OECD, 2016. – (NEA No. 7213).
14. Approaches for assessing the economic competitiveness of small and medium sized reactors. – Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2013. – 271 p.
15. Кузнецов В.П., Демин В.Ф., Макаров В.И., Молчанов А.С., Созонюк В.А., Шмелев В.М. Аспекты страхования гражданской ответственности за ядерные риски от атомных станций малой мощности // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – № 2. – С. 88-95.
16. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Сивинцев Ю.В., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей. – М.: ИБРАЭ РАН, 2015. – 699 с.
17. Саркисов А.А., Антипов С.В., Билашенко В.П., Высоцкий В.Л., Ильющенко Г.Э., Калантаров В.Е., Кобринский М.Н., Смоленцев Д.О., Сотников В.А., Хохлов И.Н., Шведов П.А. Математическая модель для оценки технического состояния и прогноза разрушения защитных барьеров затопленных радиационно опасных объектов // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. – Вып. 2. – С. 99-104.
18. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин А.Т., Данилян В.А., Кобзев В.И., Крышев И.И., Лавковский С.А., Мазокин В.А., Никитин А.И., Петров О.И., Пологих Б.Г., Скорик Ю.И. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). – М.: ИздАТ, 2005. – 624 с.
19. Reistad Ole, Шлgaard Povl L. Russian Nuclear Power Plants for Marine. – NKS-138 (ISBN 87-7893-200-9), 2006. – 92 p.
20. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихреразрешающая 1/10 модель Мирового океана. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 45-55.

21. Приказ Ростехнадзора от 04.09.2017 № 351. Электронный ресурс:
<https://rg.ru/2017/09/29/rostehnadzor-prikaz351-site-dok.html> (дата обращения
07.02.2018).

Поступила в редакцию 06.03.2018 г.

Авторы

Саркисов Ашот Аракелович, советник РАН, академик, профессор, д-р техн. наук
E-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru

Антипов Сергей Викторович, заместитель директора, д-р техн. наук
E-mail: santipov@ibrae.ac.ru

Смоленцев Дмитрий Олегович, научный сотрудник
E-mail: dsmol@ibrae.ac.ru

Билашенко Вячеслав Петрович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: bilvp@ibrae.ac.ru

Кобринский Михаил Натанович, заместитель зав. отделом, канд. физ.-мат. наук
E-mail: mnk@ibrae.ac.ru

Сотников Владимир Андреевич, инженер, канд. техн. наук
E-mail: vasotnikov@mail.ru

Шведов Павел Алексеевич, заместитель зав. отделом
E-mail: spa@ibrae.ac.ru

UDC 621.039.58

SAFE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER TECHNOLOGIES IN THE ARCTIC: PROSPECTS AND APPROACHES

Sarkisov A.A., Antipov S.V., Smolentsev D.O., Bilashenko V.P., Kobrinsky M.N.,
Sotnikov V.A., Shvedov P.A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences
52 Bolshaya Tulsкая Str., Moscow, 115191 Russia

ABSTRACT

The demands for nuclear power technologies in the Arctic to solve social and economic problems of the state can only be satisfied if adequate strategies of their safe handling at all stages from design to decommissioning are defined, methodological approaches and mathematical models to predict and minimize adverse environmental impacts of potential emergencies at such facilities are developed, and scientifically-based results yielded within a decision-making support system for the elimination of such emergencies are applied. Special relevance of these requirements is determined by unique features of the Arctic nature and its role in the generation of climatic and hydrological processes in the World Ocean.

The paper presents the main outcomes and the general conclusions based on the analysis of radiological consequences of the wide-scale application of nuclear power industry for the benefit of economical development of the Arctic region. The analysis was performed within the framework of the complex research project «Development of the methodological approaches and mathematical models to assess the environmental impact of the possible accidents at the floating nuclear power objects, model calculations of the radiation propagation in the Arctic aquatic territories in case of

emergency situations». The increasing demand for the low-power nuclear power sources for the benefit of development of the remote areas, the technological and economical advantages of such sources as well as minimal possible ecological consequences of the hypothetic accidents resulted in the qualitative changes in the attitude towards their usage. We present the estimated scale of usage of the nuclear power and the result of numeric modeling of the activity diffusion in case of emergencies. The conclusion is obtained about the necessity to follow the development strategy of low-power nuclear sources based on the modular concept of their design.

Key words: Arctic region, nuclear icebreaking fleet, Low-Power Nuclear Power Plant, development forecast, radiation safety, sea areas, mathematical modeling.

REFERENCES

1. *Low-Power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems*. Vol. 2. Ed. by akad. RAN A.A. Sarkisov. Moscow: Akadem-Print Publ., 2015, 387 p. (in Russian).
2. Sarkisov A.A. Introductory Paper of the Chairman of the Conference Scientific Committee. *Low-Power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems*. Moscow: Nauka Publ., 2011, v. 1, pp. 7-12 (in Russian).
3. *The History of Nuclear Power of the Soviet Union and Russia: a Collection of Articles*, iss. 1-5, iss. 5: History of Low-Power Nuclear Power Plants. Ed. by V.A. Sidorenko. Ros. nauch. centr «Kurchatovsky institut». Moscow. IzdAT Publ., 2004, 168 p. (in Russian).
4. Ruksha V.V., Golovinskiy S.A., Belkin M.S. Icebreaker support for the largest national Arctic hydrocarbon projects. *Arctic: ecology and economy*. 2016, no. 4 (24), pp. 109-113 (in Russian).
5. Kashka M.M., Smirnov A.A., Golovinskiy S.A., Vorobyev V.M., Ryzhkov A.V., Babich Ye.M. The prospects for development of nuclearpowered icebreaker fleet. *Arctic: ecology and economy*. 2016, no. 3 (23), pp. 98-107 (in Russian).
6. JSC «Afrikantov OKBM». Reactor Facilities for Nuclear Icebreakers and Optimized Floating Blocks. Available at: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/ritm-200_extended_ru_web.pdf (accessed Feb. 7, 2018) (in Russian).
7. Kudinov I.V. *Nuclear Power Facilities of the Prospective Objects of Civilian Marine Machinery and Justification of Their Safety*. Dr. tech. sci. diss. St. Petersburg. Krylov State Research Centre Publ., 2016, 292 p. (in Russian).
8. Compact Nuclear Batteries for Arctic are to be Constructed for Ministry of Defense by 2023. Available at: <http://tass.ru/armiya-i-opk/4508435> (accessed Feb. 7, 2018) (in Russian).
9. Sarkisov A.A., Smolentsev D.O., Antipov S.V., Bilashenko V.P., Shvedov P.A. Economic Efficiency and Possibilities of Using Megawatt-class Nuclear Power Sources in the Arctic. *Arctic: ecology and economy*, 2018, no. 1 (29), pp. 4-14 (in Russian).
10. Nikitin V.S., Polovinkin V.N., Simonov Yu.A., Ustinov V.S., Kuznetsov V.P., Makarov V.I. Nuclear Energy in the Arctic Region. *Arctic: ecology and economy*, 2015, no. 4 (20), pp. 86-95 (in Russian).
11. Smolentsev D.O. Development of the Arctic energy sector: problems and capabilities of low-power generation. *Arctic: ecology and economy*, 2012, no. 3 (7), pp. 22-29 (in Russian).
12. Possibilities for Employment of Low-power NPPs for Providing Power Supply to Civilian Customers. Result of the Scientific and Technical Board of the Unified Energy System and the Section on the Problems of Reliability and Safety of Large Energy Systems of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Electric Power Systems Research. *Vesti v Elektroenergetike*, 2016, no. 6 (86), pp. 36-44 (in Russian).
13. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-Term Deployment. [S. l.]: OECD, 2016. (NEA No. 7213).
14. *Approaches for assessing the economic competitiveness of small and medium sized reactors*. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2013. – 271 p.

15. Kuznetsov V.P., Demin V.F., Makarov V.I., Molchanov A.S., Sozonyuk V.A., Shmelev V.M. Aspects of Liability Insurance of Nuclear Risks from the Low-power Nuclear Power Plants. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2014, no. 2, pp. 88-95 (in Russian).
16. Sarkisov A.A., Vysotskiy V.L., Sivintsev Yu.V., Nikitin V.S. *Nuclear Legacy of the Cold War at the Arctic Seabed. Radiological and Technico-Economical Issues of the Sea Radiological Remediation*. Moscow. IBRAE RAS Publ., 2015, 699 p. (in Russian).
17. Sarkisov A.A., Antipov S.V., Bilashenko V.P., Vysotskiy V.L., Ilyushchenko G.E., Kalantarov V.Ye., Kobrinskiy M.N., Smolentsev D.O., Sotnikov V.A., Khokhlov I.N., Shvedov P.A. Mathematical Model for Evaluating the Technical Condition and Predicting Collapse of Protective Barriers on Flooded Radiation-Hazardous Sites. *Atomnaya Energiya*. 2018, v. 124, iss. 2, pp. 99-104 (in Russian).
18. Sivintsev Yu.V., Vakulovskiy S.M., Vasilyev A.P., Vysotskiy V.L., Gubin A.T., Danilyan V.A., Kobzev V.I., Kryshev I.I., Lavkovskiy S.A., Mazokin V.A., Nikitin A.I., Petrov O.I., Pologikh B.G., Skorik Yu.I. *Technogenic Radionuclides in the Seas Surrounding Russia. Radioecological Consequences of Radioactive Waste Dumping in the Arctic and Far Eastern Seas* («The White Book - 2000»). Moscow. Izdat Publ., 2005, 624 p. (in Russian).
19. Reistad Ole, Illgaard Povl L. *Russian Nuclear Power Plants for Marine*. NKS-138 (ISBN 87-7893-200-9), 2006, 92 p.
20. Ibrayev R.A., Khabeyev R.N., Ushakov K.V. Eddy-resolving $1/10^\circ$ Model of the World Ocean. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*. 2012, v. 48, no. 1, pp. 45-55 (in Russian).
21. Rostekhnadzor Order of 09.04.2017 No. 351. Available at: <https://rg.ru/2017/09/29/rostekhnadzor-prikaz351-site-dok.html> (accessed Feb. 7, 2018) (in Russian).

Authors

Sarkisov Ashot Arakelovich, Advisor of the Russian Academy of Sciences, Academician, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sarkisov@ibrae.ac.ru

Antipov Sergey Viktorovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: santipov@ibrae.ac.ru

Smolentsev Dmitry Olegovich, Researcher

E-mail: dsmol@ibrae.ac.ru

Bilashenko Vyacheslav Petrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: bilvp@ibrae.ac.ru

Kobrinsky Mikhail Natanovich, Deputy Head of Department, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: mnk@ibrae.ac.ru

Sotnikov Vladimir Andreevich, Engineer, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: vasotnikov@mail.ru

Shvedov Pavel Alekseevich, Deputy Head of Department

E-mail: spa@ibrae.ac.ru