

DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-123-136
УДК 622.012:621.311:658.261

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБОСНОВАНИЮ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Н. Н. Мельников, С. А. Гусак, П. В. Амосов, В. А. Наумов,
А. В. Наумов, А. О. Орлов, С. Г. Климин, Ю. Г. Смирнов
Горный институт Кольского научного центра РАН
(Апатиты Мурманской области, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 июня 2018 г.

Представлены некоторые результаты комплексных исследований, связанных с разработкой научных и инженерных основ создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности (АСММ) в скальных массивах российской Арктики. Разработаны и опробованы методические подходы для обоснования рекомендаций, направленных на обеспечение различных аспектов безопасности (ядерной, радиационной, тепловой) при эксплуатации подземных АСММ. Приведены основные концептуальные положения методологии создания подземных комплексов АСММ в условиях Арктики.

Ключевые слова: арктические регионы, криолитозона, подземные комплексы, атомные станции малой мощности, отработавшее ядерное топливо, тепловые воздействия.

Комментарий редакции журнала «Арктика: экология и экономика»

После Чернобыльской аварии в связи с широким общественным протестом, направленным на прекращение дальнейшего строительства атомных электростанций, большой интерес был проявлен к строительству этих объектов под землей как возможному направлению радикального повышения их безопасности. Однако последующие научные исследования показали, что строительство атомных электростанций под землей не может рассматриваться как альтернативное направление атомной энергетики (Саркисов А. А., Николаев Ю. Б. Итоги обсуждения проблемы строительства подземных АЭС на секции ОФТПЭ АН СССР // Энергетич. стр.-во. — 1990. — № 6). В 1990-х годах этот вопрос был снят с повестки дня также и с точки зрения экологических и технико-экономических параметров.

В то же время в отдельных случаях подходящие природные условия и геологическая структура какого-либо региона могут оказаться благоприятными для размещения атомных электростанций под землей. С учетом особенностей экологии Арктики и ее чувствительности к антропогенным воздействиям строительство здесь отдельных подземных атомных электростанций может оказаться целесообразным.

Статья публикуется с учетом данного комментария.

Введение

Среди рисков и угроз, характеризующих текущее состояние социально-экономического развития арктических регионов России, в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [1] отмечаются износ основных фондов энергетической инфраструктуры, высокая

энергоёмкость добычи природных ресурсов, неразвитость энергетической системы, нерациональная структура генерирующих мощностей, высокая себестоимость генерации и транспортировки электроэнергии. Именно поэтому создание альтернативных источников энергии в арктических регионах рассматривается в качестве одной из приоритетных задач, решение которых направлено на достижение главных целей государственной политики Российской Федерации в Арктике.

© Мельников Н. Н., Гусак С. А., Амосов П. В., Наумов В. А.,
Наумов А. В., Орлов А. О., Климин С. Г., Смирнов Ю. Г., 2018

Указанное приоритетное направление развития российской Арктики обуславливает реальные перспективы практического внедрения инновационных проектов атомных станций малой мощности (АСММ). На сегодня российские разработчики предлагают широкий спектр реакторных установок (РУ) различного типа, которые могут быть использованы для энергообеспечения потребителей на удаленных территориях Арктики. Проекты РУ, которые характеризуются экономической эффективностью в специфических условиях применения, основаны на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации судовых РУ, сформировавшем потенциал реакторных технологий в области создания АСММ [2—4].

Использование АСММ в качестве автономных источников энергии и необходимость их приближения к потребителям, особенно на удаленных и труднодоступных территориях, обуславливают дополнительные требования по обеспечению безопасности атомных энергоисточников. В совокупности с барьерами безопасности, предусмотренными проектами АСММ, комплексная безопасность, включая решение задач физической защиты и защиты от внешних воздействий техногенного и природного характера, может быть обеспечена при подземном размещении атомных энергоблоков за счет изолирующих свойств вмещающих породных массивов.

В настоящей статье рассматриваются некоторые результаты исследований Горного института Кольского научного центра РАН, которые были направлены на разработку научно-методических основ создания подземных комплексов для размещения АСММ в арктических условиях.

Предпосылки к применению АСММ для энергоснабжения арктических регионов

Несомненно, роль и эффективность АСММ должны рассматриваться с учетом реальной потребности в энергообеспечении объектов и перспектив социально-экономического развития арктических регионов. Говоря о социально-экономическом развитии, следует отметить, что индустриальное освоение Арктики и формирование пространственной экономической структуры началось тогда, когда, с одной стороны, в основе размещения производства лежали военно-стратегические интересы, а с другой — экономика Севера формировалась как часть единого народно-хозяйственного комплекса. В результате экономика арктических регионов имеет очаговый тип промышленно-хозяйственного освоения территорий, высокую ресурсоемкость и значительную зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от «северного завоза». При этом сложившаяся структура экономики большинства арктических регионов слабо диверсифицирована и носит моноотраслевой характер с превалированием горнодобывающей промышленности [5]. В пространственном развитии российской Арктики четко выделяется группа старопромышленных регионов

(Мурманская и Архангельская области, Красноярский край), освоение которых началось более 75 лет назад, и группа регионов относительно недавнего масштабного промышленного освоения (30—40 лет назад): Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Чукотский автономные округа, арктические районы Республики Саха (Якутия) [5; 6].

Особенность пространственного развития арктических регионов в определенной степени сказалась и на развитии их энергетической инфраструктуры. В рамках рассматриваемой научно-исследовательской работы был выполнен анализ проблем и перспектив развития энергетического комплекса регионов недавнего масштабного промышленного освоения. В них энергетика в наибольшей степени характеризуется децентрализованным энергоснабжением, и роль малой энергетике в обеспечении энергетической безопасности является определяющей.

В децентрализованной зоне энергоснабжения в качестве автономных энергоисточников в основном используются дизельные и газотурбинные электростанции. В незначительных масштабах также применяются возобновляемые источники энергии. Высокая стоимость топлива для автономных энергоисточников, связанная с их разбросанностью, слабым развитием транспортной инфраструктуры и сложной схемой сезонного завоза топлива, обуславливает высокую себестоимость вырабатываемой энергии. При этом рассредоточенность и величина нагрузки энергопотребителей в большинстве случаев приводят к выводу о нецелесообразности подключения таких потребителей к региональным энергосистемам. Поэтому проблемы энергоснабжения в труднодоступных и удаленных районах определяют объективную необходимость развития локальной энергетике на основе использования автономных источников энергии.

Оценка эффективности различных вариантов энергоснабжения децентрализованной зоны восточных регионов России была выполнена в рамках многолетних исследований Института систем энергетике им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения РАН [7; 8]. Их результаты позволили, в частности, сделать вывод, что для перспективных горнопромышленных предприятий, расположенных в арктических регионах, где отсутствует энергетическая инфраструктура, в качестве альтернативы традиционному варианту следует рассматривать строительство АСММ. Рациональным местом размещения АСММ являются труднодоступные районы со сложной схемой доставки топлива и значительным перспективным ростом электрических нагрузок, связанным с разработкой месторождений полезных ископаемых. Сравнительная оценка эффективности АСММ и энергоисточников на органическом топливе позволила также определить граничные значения себестоимости производства электроэнергии для достижения конкурентоспособности АСММ [7].

Таблица 1. Эффективный коэффициент размножения нейтронов для эксплуатационного (сухого) состояния и аварийного сценария обводнения контейнера ТУК-120 с топливом из РУ различного типа

Тип РУ	Масса ^{235}U в контейнере, кг	$K_{эф}$		
		Нормальная эксплуатация	Аварийный сценарий	
			Разгерметизация крышки контейнера	Разгерметизация контейнеров и чехлов
УНИТЕРМ	82,4	0,231	0,775	0,847
АБВ-6	79,8	0,215	0,630	0,785
РИТМ-200	118	0,237	0,645	0,797
СВБР-100	348	0,601	0,863	—

Исследования безопасности хранилища отработавшего ядерного топлива

Удаленность потенциальных площадок размещения АСММ от центров атомного машиностроения и объектов переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) обусловила постановку и проведение исследований различных аспектов безопасности хранения ОЯТ, которое накапливается за время эксплуатации АСММ. На основе разработанных математических моделей топливных циклов активных зон реакторов была выполнена оценка радиоактивности ОЯТ реакторных установок АСММ различных типов (АБВ, РИТМ-200М, УНИТЕРМ, СВБР-10 и СВБР-100). Результаты этой оценки, подробно рассмотренные в [9], позволили сделать вывод о применимости технологии, используемой на реакторах-прототипах (судовых реакторных установках) в транспортно-технологических схемах обращения с ОЯТ реакторов АСММ.

Исследования безопасности подземного хранилища ОЯТ реакторов АСММ базировались на концепции сухого хранения топлива в контейнерах ТУК-120, которые используются для долговременного хранения ОЯТ атомных ледоколов в береговом хранилище контейнерного типа на площадке ФГУП «Атомфлот» [10]. Конструкция контейнера ТУК-120 достаточно подробно представлена в [11]. В рамках исследований безопасности хранилища ОЯТ реакторов АСММ количество отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), размещаемых в контейнерах для ОЯТ реакторов различного типа, определялось с учетом конструкции тепловыделяющих сборок, применяемых в активных зонах этих реакторов.

Оценка ядерной безопасности подземного хранилища ОЯТ

Целью оценки ядерной безопасности при хранении ОЯТ в подземном модуле являлось определение компоновки ОТВС в контейнере, отвечающей нормативному требованию по безопасности, критерием

которой является условие не превышения величины эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эф}$ значения 0,95. В этих оценках рассматривались два состояния контейнера и соответственно два сценария: сценарий нормальной эксплуатации и аварийный сценарий.

Сценарий нормальной эксплуатации изучен с помощью программы РИТМ [12], в алгоритме которой предусмотрена возможность определения $K_{эф}$, пространственно-энергетического распределения нейтронов и интегральных параметров переноса нейтронов, характеризующих контейнер ТУК-120 как размножающую нейтроны «реакторную» систему (вероятность избежать поглощения при замедлении, квадрат длины миграции).

Аварийный сценарий постулируется как обводнение контейнера, при котором следует рассматривать две ситуации. При первой из них обводнение происходит вследствие разгерметизации крышки контейнера, и вода заполняет полости вокруг чехлов. Вторая ситуация может реализоваться при разгерметизации как крышки контейнера, так и чехлов с ОТВС. В этом случае вода заполняет все полости в контейнере. Разгерметизация контейнера и заполнение его водой приводят к росту $K_{эф}$, что объясняется высокой замедляющей способностью молекул воды, снижающей как поглощение, так и пробег нейтронов в процессах рассеяния и замедления быстрых нейтронов деления в среде источника. Кроме того, присутствие воды в контейнере видоизменяет спектр плотности потока нейтронов, смещая его в область низких энергий. Для изучения аварийного сценария использовался программный комплекс КРАТЕР [13], на основе которого были разработаны математические модели нейтронно-физических процессов в контейнерах и проведены расчеты параметров размножения нейтронов контейнеров ТУК-120.

В табл. 1 приведены результаты исследований, на основе которых определены ядерно безопасные загрузки контейнеров и их ориентировочное коли-

Таблица 2. Эффективная мощность дозы от нейтронного и гамма-излучения на расстоянии 1 м от поверхности контейнера с топливом из РУ различных типов

Тип РУ	Характеристика источников излучения в контейнере		Эффективная мощность дозы, мЗв/ч
	Активность ^{137}Cs , ПБк	Объемная мощность источников нейтронов спонтанных делений, нейтр./ $(\text{см}^3 \cdot \text{с})$	
УНИТЕРМ	2,96	52,3	0,0037
АБВ-6	3,72	56,6	0,0048
РИТМ-200М	5,43	58,8	0,0059
СВБР-100	13,4	5,63	0,0037

чество, необходимое для размещения ОТВС одной активной зоны (УНИТЕРМ — 4 контейнера, АБВ-6 — 3 контейнера, РИТМ-200М — 5 контейнеров, СВБР-10 — 2 контейнера, СВБР-100 — 5 контейнеров).

Таким образом, для рассмотренных компоновок контейнера ТУК-120 показана ядерная безопасность контейнеров как в условиях нормальной эксплуатации, так и при авариях, связанных с обводнением контейнера.

Оценка радиационной безопасности подземного хранилища ОЯТ

Целью изучения радиационной безопасности являлась оценка приемлемости принятых решений по количеству ОТВС в контейнерах и компоновке контейнеров в подземном модуле хранилища ОЯТ на основе сравнения вычисленных значений суммарной эффективной мощности дозы нейтронного и гамма-излучения с предельно допустимыми дозовыми нагрузками на обслуживающий персонал. Значения интенсивности ионизирующих излучений оценены с учетом радиоактивного распада за время выдержки ОЯТ в приреакторных хранилищах по данным о массовых составах долгоживущих продуктов деления и актиноидов, приведенных в [9].

Для расчетов эффективной мощности дозы гамма-излучения, испускаемого при радиоактивном распаде продуктов деления (в основном ^{137}Cs), на поверхности одиночного контейнера и в его окрестности, рассматриваемой как зона работы обслуживающего персонала, была использована математическая программа DOZRAD, разработанная в Горном институте. На основании геометрических параметров контейнера поставленная задача решалась применительно к цилиндрическому источнику и защите в виде цилиндрического слоя (корпус контейнера). Алгоритм решения основан на формализованном представлении функции ослабления излучения, учитывающей самопоглощение излучения в источнике и поглощение в защите. Наиболее подробно алгоритм, реализованный в программе DOZRAD, изложен в [11].

Для расчетов мощности дозы от нейтронов, рождающихся при спонтанных делениях актиноидов

(основными среди них являются ^{238}Pu , ^{240}Pu и ^{244}Cm) использована программа РИТМ. Алгоритм этой программы позволяет решать уравнение переноса нейтронов в многозонных гетерогенных средах методом вероятности прохождения нейтронов, при этом энергетическая часть задачи рассматривается в 95-групповом приближении [12].

В табл. 2 приведены результаты расчетов мощности дозы на расстоянии 1 м от поверхности одиночного контейнера. Это расстояние рассматривалось в качестве реперной точки размещения персонала в центре ячейки хранилища из четырех контейнеров при их компоновке, аналогичной береговому хранилищу ОЯТ на площадке ФГУП «Атомфлот» (шаг расположения контейнеров в ряду 2,35 м, расстояние между рядами 2,7 м [10]).

Результаты исследований являются основой для разработки регламента и численности персонала при обращении с контейнерами. Из приведенных в табл. 2 данных следует, что суммарная величина мощности дозы от четырех контейнеров в центре ячейки хранилища может считаться приемлемой с точки зрения выполнения нормативных требований по радиационной безопасности [10; 14].

Оценка тепловой безопасности подземного модуля хранения ОЯТ

Для оценки тепловой безопасности подземного хранилища ОЯТ были использованы параметры подземных модулей (радиоактивность ОЯТ в контейнерах, их количество и компоновка в хранилище), которые были установлены по результатам изучения ядерной и радиационной безопасности. На основе этих данных определялась величина мощности остаточного энерговыделения (МОЭ) в отдельных контейнерах и суммарная величина МОЭ в модулях хранения ОЯТ для каждого типа РУ.

Основное внимание в исследовании тепловой безопасности было уделено оценке эффективности свободной конвекции в процессе отвода тепла от контейнеров с ОЯТ. Численные эксперименты выполнялись на основе модели одиночного наиболее энергонапряженного контейнера с помощью математической программы FFM, разработанной

Таблица 3. Параметры теплового режима контейнера ТУК-120 на стадии разогрева

Тип реактора	Начальная МОЭ в ТУК-120, Вт	Максимальная температура, °С		Длительность стадии разогрева контейнера, сут
		в зоне размещения ОТВС	на боковой поверхности контейнера	
АБВ	1410	83	48	70
УНИТЕРМ	910	67	41	100
РИТМ-200	2290	102	56	65
СВБР-10	2200	146	70	80
СВБР-100	2950	186	84	75

в Горном институте и позволяющей реализовать численное решение уравнения нестационарной теплопроводности в трехмерной постановке. Методические подходы, на которых базировались расчетные исследования одиночного контейнера, достаточно подробно рассмотрены в [11].

Главной задачей при определении тепловой безопасности хранилища ОЯТ являлась оценка максимальной температуры ОТВС (максимально допустимая температура принята равной 350°С для реакторов водо-водяного типа и 430°С для реакторов типа СВБР) и максимальной температуры наружной поверхности контейнеров (85°С).

В обобщенном виде результаты изучения теплового состояния контейнеров с ОЯТ приведены в табл. 3.

Результаты выполненных расчетных исследований позволили сделать предварительный вывод, что свободная конвекция может быть эффективной составляющей в процессе отвода остаточных тепловыделений при обеспечении нормативных требований по тепловой безопасности сухого хранения контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа.

Исследования теплового взаимодействия подземного комплекса АСММ с породным массивом

Подземное размещение АСММ предъявляет особые требования к конструктивно-компоновочным и инженерно-техническим решениям, которые должны учитывать режим эксплуатации подземного объекта с температурой внутренней среды выше температуры фазового перехода «лед-вода» в мерзлых породах. Техногенное воздействие, обусловленное температурным режимом эксплуатации горных выработок (подземных модулей АСММ), является одним из основных факторов, которые определяют специфические особенности проблем, связанных с размещением подземных комплексов АСММ в условиях криолитозоны. Из практики подземного строительства известно, что оттаивание мерзлых пород приводит к уменьшению или потере цементующего действия льда и, как следствие этого,

к снижению устойчивости горных пород. Формирующиеся при этом нагрузки на крепь от протаявших пород могут превышать ее несущую способность.

Возможные криогенно-технологические осложнения, обусловленные тепловым фактором, обуславливают актуальность изучения особенностей теплового взаимодействия подземных сооружений с мерзлыми породами как одной из приоритетных научно-технических задач в рамках комплексных исследований по обоснованию методологии создания подземных комплексов для размещения АСММ в условиях Арктики. В рамках научно-исследовательских работ, проводимых в Горном институте, были выполнены обширные исследования различных факторов, которые оказывают влияние на процессы теплового взаимодействия подземной АСММ с массивом многолетнемерзлых пород (ММГП).

На начальном этапе этих исследований рассматривались инженерные методы расчета тепловых полей в массиве мерзлых пород. В частности, на основе методического подхода, изложенного в работе М. Г. Фельдмана [15], были выполнены оценки стационарной чаши оттаивания мерзлых пород под реакторным модулем АСММ котлованного типа при вариации параметров модели (размера модуля, температуры атмосферы в модуле, отношения коэффициентов теплопроводности талой и мерзлой породы) для двух потенциальных площадок размещения атомного энергоисточника. Результаты оценок опубликованы в [16 и 17].

На последующих этапах исследования базировались на численных методах решения уравнения нестационарной теплопроводности в двухмерной и трехмерной постановке, позволяющего изучить нестационарный характер формирования температурного поля в породном массиве, в том числе с учетом фазового перехода «лед-вода» в мерзлых породах. Некоторые результаты этих исследований опубликованы в ряде работ (см., например, [17—19]). В настоящей статье рассматриваются две задачи, которые решались в рамках проблемы оптимизации компоновочных решений подземного комплекса АСММ:

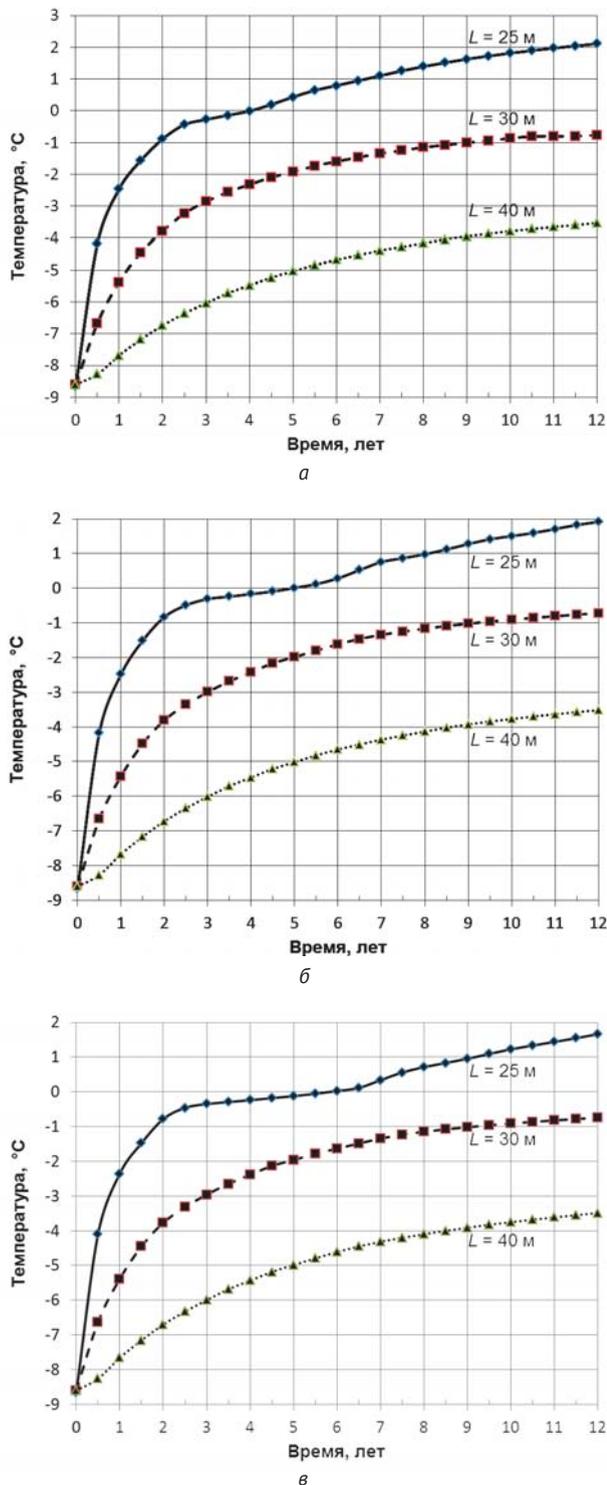


Рис. 1. Динамика температуры в точке мониторинга при различных расстояниях между модулями и вариации пористости ММГП: а – 5%, б – 10%, в – 15%

- оценка глубины оттаивания криолитозоны в зависимости от расстояния между модулями и пористости массива;
- влияние площади основания модуля на глубину оттаивания криолитозоны.

В качестве «инструмента» для выполнения численных экспериментов использована программа COMSOL. В обеих задачах размеры слоя криолитозоны, начальные и граничные условия, а также теплофизические параметры модели принимались в соответствии с данными [19].

Оценка глубины оттаивания криолитозоны в зависимости от расстояния между модулями и пористости массива

Исследование выполнялось для упрощенного варианта размещения многомодульной подземной АСММ [19]: два реакторных модуля цилиндрической формы (радиус 10 м, высота 20 м), которые размещены в ММГП (при вариации пористости от 5% до 15%) на глубине в отметках –80 м и –60 м при различном расстоянии между центрами модулей (от 25 до 60 м). Толщина слоя обделки горных выработок принята равной 1 м. Продолжительность времени моделирования ограничена 12 годами, что обусловлено значительными затратами процессорного времени в численных экспериментах с высокими значениями пористости ММГП.

При анализе результатов численных экспериментов помимо картины пространственного распределения температуры вокруг модулей, позволяющей составить качественное представление о тепловом состоянии массива, рассматривался ряд количественных показателей. В частности, интерес представляли динамика изменения температуры в критической точке моделируемой области и пространственные распределения температуры на конкретных участках пространства. В качестве такого репера была выбрана точка криолитозоны между модулями АСММ, температура в которой является объективным показателем смыкания зон оттаивания между моделями.

Графики на рис. 1 свидетельствуют, что за рассматриваемый период (12 лет) имеет место смыкание оттаявшей породы только в ситуации минимального расстояния между модулями.

Причем это смыкание происходит быстрее в случае, когда пористость криолитозоны составляет 5%. В этом случае процесс смыкания происходит примерно через 4 года (рис. 1а). С увеличением пористости до 10% и 15% смыкание оттаявшей породы прогнозируется в районе 5 и 6 лет соответственно (см. рис. 1б и 1в). Такое поведение анализируемых кривых укладывается в ранее высказанное авторами утверждение о снижении глубины оттаивания ММГП с ростом ее пористости [17]. Увеличение расстояния между центрами модулей до 30 м позволяет обеспечить целостность криолитозоны в течение моделируемого срока. Экстраполяция расчетных данных на более длительные сроки показывает, что «запас» во времени весьма невелик — порядка 5—6 лет. При расстоянии 40 м прогнозируется целостность криолитозоны на существенно более продолжительный период.

Анализ результатов численных экспериментов позволил сделать следующие выводы:

- прогнозируется смыкание оттаявшей породы в зависимости от пористости ММГП через 4—6 лет функционирования АСММ при расстоянии между центрами модулей 25 м;
- в течение 12-летнего периода сохранность ММГП обеспечивается при расстоянии между центрами модулей 30 м независимо от величины пористости криолитозоны, однако временной «запас» сохранности криогенного состояния невелик (5—6 лет);
- независимо от величины пористости криолитозоны расстояние 40 м и более между центрами модулей обеспечивает безусловную долговременную сохранность криогенного состояния ММГП.

Влияние площади основания модуля на глубину оттаивания криолитозоны

В рамках обозначенной задачи рассмотрены два варианта: АСММ с реакторными установками АБВ-6 и СВБР-100. Геометрические параметры объектов (по данным проектов АСММ в наземном исполнении) следующие: для АСММ с АБВ-6 — реакторное отделение (РО) 16×16×32 м и турбинное отделение (ТО) 10×20×17,5 м; для АСММ с СВБР-100 — РО 27,5×39,3×43 м и ТО 42×66×37 м. В модельном представлении размеры модулей, нижнее основание которых располагалось на одинаковой высотной отметке –80 м, округлены и к ним добавлен метровый слой обделки. Для каждого варианта проанализированы два потенциальных способа размещения модулей с РУ и модулей с турбинами. В первом случае модули разнесены на расстоянии 10 м, а во втором они расположены максимально компактно (вплотную).

Результаты расчетов в форме изоповерхностей температуры в центральных сечениях модели на 20-летний период эксплуатации АСММ свидетельствуют, что

Таблица 4. Динамика глубины оттаивания под РО и ТО АСММ с АБВ-6 и СВБР-100, м

Модуль АСММ	Площадь основания, м ²	Время, лет			
		5	10	15	20
РО АБВ-6	324	10,7	13,3	14,7	15,3
ТО АБВ-6	264	9,8	12,4	13,5	14,4
РО СВБР-100	1230	13,3	16,6	18,1	18,6
ТО СВБР-100	2992	14,2	18,4	19,4	19,7

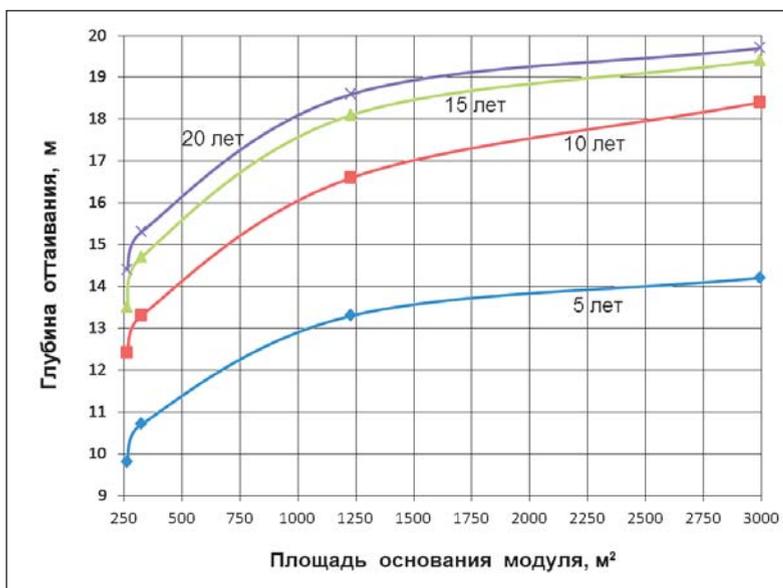


Рис. 2. Зависимость глубины оттаивания криолитозоны от площади основания модуля на конкретные моменты времени эксплуатации АСММ

при максимально компактном размещении модулей прогнозируется заметное сокращение объема оттаявшей области криолитозоны за счет пространства между модулями.

В табл. 4 и на рис. 2 обобщены расчетные данные по глубине оттаивания под реакторными и турбинными отделениями АСММ с АБВ-6 и СВБР-100 в зависимости от времени функционирования станции и размера модуля.

Представленные расчетные данные свидетельствуют о нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади основания модуля. Кривые на рис. 2 с коэффициентами достоверности не ниже 0,969 аппроксимируются логарифмическими функциями типа $H = A \ln(S) + B$, где H — глубина оттаивания, м; S — площадь основания модуля, м²; коэффициенты A и B свои для каждого момента времени (5 лет — 1,789 и 0,155, 10 лет — 2,437 и –0,959, 15 лет — 2,389 и 0,610, 20 лет — 2,192 и 2,488).

Анализ результатов численных экспериментов показал, что:

- минимальный объем оттаявшей породы обеспечивается максимально компактным размещением реакторного и турбинного отделений;
- глубина оттаивания криолитозоны нелинейным образом зависит от площади граней модулей.

В течение 20 лет эксплуатации АСММ в указанном интервале площадей оснований прогнозируется диапазон глубины оттаивания от 10 до

20 м. В первом приближении для описания нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади граней модулей подходит логарифмическая функция.

В целом, говоря о результатах исследований теплового взаимодействия подземного комплекса с массивом ММГП, можно отметить, что информация о тепловом состоянии породного массива позволяет специалистам в области геомеханики выполнить оценку напряженно-деформированного состояния породного массива в зависимости от изменения температурных полей вокруг подземных модулей АСММ на основе собственных [20] геомеханических моделей.

Научно-методические основы создания подземных комплексов АСММ

Создание подземных комплексов для размещения АСММ в сложных климатических и инженерно-геологических условиях Арктики обуславливает постановку комплексной научно-технической задачи, связанной в частности с определением архитектуры комплексов, безопасных способов и технологий строительства. Комплексный характер этой задачи определяется основной идеей подземного размещения АСММ, которая заключается в использовании защитных и изолирующих свойств породного массива, позволяющих в сочетании с инженерными защитными барьерами противостоять любому внешнему природному и техногенному воздействию и обеспечить локализацию возможных внутренних инцидентов.

Достижение этой цели определяет актуальность проблемы обеспечения надежного и безопасного функционирования подземного комплекса АСММ как элемента природно-технической геосистемы «массив горных пород — технология строительства — подземное сооружение». В такой системе, под которой понимается совокупность взаимодействующих природных и техногенных подсистем, подземный комплекс характеризуется параметрами, описывающими функциональное назначение горных выработок, и формирует требования к характеристикам вмещающего массива. Наличие тесной взаимосвязи между элементами геосистемы приводит к тому, что риск нарушения функционирования любого ее элемента может привести к нарушению функционирования всей системы. Поэтому подготовка исходных данных для проектирования и строительства подземных комплексов АСММ в сложных инженерно-геологических и горнотехнических условиях заключается в выявлении соответствия между характеристиками элементов геосистемы, а также в оценке их взаимовлияния [21].

Отдельные методологические аспекты создания подземных комплексов АСММ рассматриваются в ряде работ авторов [22—25 и др.]. В настоящей статье основное внимание уделяется

формированию факторов для выбора конструктивных элементов подземных АСММ и оценке объемно-планировочных решений подземных комплексов.

Формирование факторов для выбора конструктивных элементов подземных АСММ

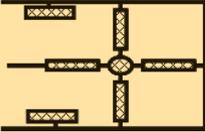
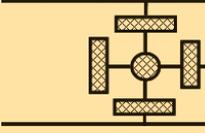
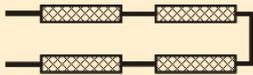
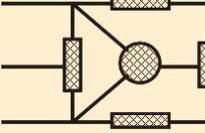
Методология разработки конструктивно-компоновочных решений подземных комплексов АСММ базируется на комплексной оценке условий строительства и эксплуатации и единых архитектурных решениях, обеспечивающих длительную динамическую устойчивость и долговечность горных выработок и строительных конструкций.

Несомненно, при выборе конструктивно-компоновочных решений подземного комплекса прежде всего необходимо учитывать факторы, которые могут оказать влияние на безопасную и эффективную эксплуатацию АСММ при минимально возможных техногенных изменениях окружающей среды. В соответствии с этим положением, которое подтверждается опытом эксплуатации подземных атомных станций, структура системы безопасности такого объекта имеет два основных уровня. Первый из них характеризуется проектными параметрами РУ, а второй отражает требования к подземному комплексу, включая свойства вмещающего породного массива и эффективность элементов комплекса, обеспечивающих локализацию возможных внутренних инцидентов.

Отсюда следует, что конструктивно-компоновочные решения подземного комплекса должны быть связаны с назначением АСММ, особенностями конструкции и режимов эксплуатации РУ с учетом технологических схем работы всего подземного комплекса. Наряду с длительной устойчивостью подземных сооружений такие решения должны обеспечивать безопасную эксплуатацию РУ при приемлемых технико-экономических показателях. В структуре факторов, определяющих выбор конструктивно-компоновочных решений с учетом комплексного характера требований, можно выделить четыре взаимосвязанных составляющих:

- горно-геологические условия, определяющие требования при выборе площадок для размещения подземной АСММ;
- технические характеристики подземного комплекса, которые отражают конструктивные и эксплуатационные параметры реакторных установок и конструктивно-компоновочные параметры подземных выработок;
- технологические параметры, характеризующие технические особенности и экономические показатели строительства подземного комплекса;
- блок обеспечения безопасности, в котором интегрированы риски при проведении горно-строительных работ и при эксплуатации всех элементов подземного комплекса.

Таблица 5. Схемы с последовательным размещением основных КВ (1) и со смешанной компоновкой главных КВ и кольцевой транспортной схемой (2)

Схема 1 (план)	Достоинства и недостатки	Схема 2 (план)	Достоинства и недостатки
	Небольшой объем горно-капитальных работ. Отсутствует запасной аварийный выход на дневную поверхность (тупиковая схема)		Полностью независимая транспортная схема. Трудности в ориентации КВ относительно главных напряжений
	Независимая транспортная схема		
	Небольшой объем горно-капитальных работ. Ограниченная транспортная схема, затруднена аварийная эвакуация		Сквозная транспортная схема. Трудности в ориентации КВ относительно главных напряжений

Оценка объемно-планировочных решений подземных комплексов

Объемно-планировочные решения подземного комплекса должны быть ориентированы на функционально-технологические принципы, направленные на максимальное сближение объектов реакторной группы, имеющих при эксплуатации технологические связи. Большое разнообразие проектных решений подземных комплексов обусловили выполнение оценки их рациональности. Для решения этой задачи рассмотрены наиболее характерные схемы визуализированных моделей, которые объединены в группы по принципу взаимного расположения основных камерных выработок (КВ):

- схемы с последовательным размещением основных КВ;
- схемы с параллельным расположением КВ;
- схемы со смешанной компоновкой и единичной протяженной (главной) КВ;
- схемы со смешанной компоновкой главных КВ и кольцевой транспортной схемой.

В качестве примера в табл. 5 приведены схемы с последовательным размещением основных КВ и со смешанной компоновкой главных КВ.

Результаты оценки, которая выполнялась на основе анализа объемно-планировочных решений по различным критериям с примерно одинаковым удельным весом (аварийная эвакуация, геомеханические условия, пересечение выработок, организация транспортных схем, объем горно-капитальных

работ, размещение оборудования, решения по вентиляции), приведены на рис. 3.

В целом рассмотренные в работе концептуальные подходы позволили сформулировать основные положения методологии создания подземных комплексов АСММ, которая базируется на определенной последовательности реализации проектных решений и может быть представлена в виде алгоритма, отражающего основные задачи строительной геотехнологии при создании подземных АСММ:

- На этапе проектирования АСММ главными факторами являются принятая концепция подземного объекта, глубина размещения, тип оборудования, а также условия и время эксплуатации.
- На этапе выбора площадки под строительство основное внимание отводится способу вскрытия, геологической изученности, физико-механическим характеристикам массива.
- На этапе проектирования отдельных конструктивных элементов обосновываются конструктивно-компоновочные и объемно-планировочные решения, технические параметры всех выработок и модулей с учетом сочетания различных нагрузок. Проводится экономическая оценка и определяются сроки строительства.
- На этапе строительства объекта реализуются все принятые решения. Основное значение придается факторам, связанным с обоснованием технологии, способов, методов организации и управления

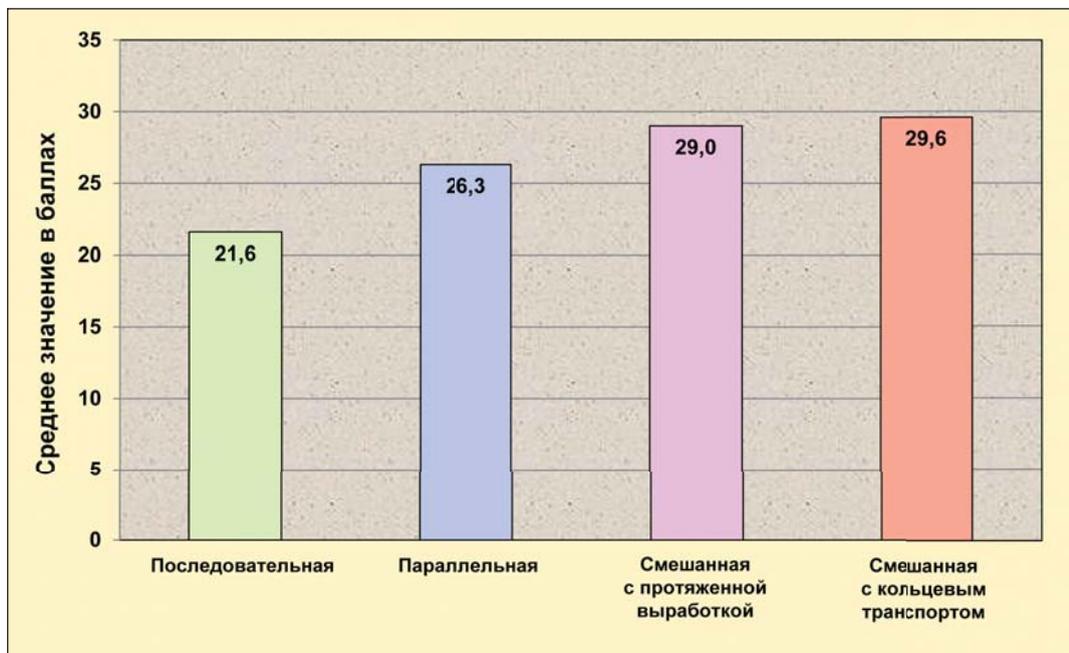


Рис. 3. Оценка рациональности схем компоновки подземного комплекса

горно-строительными работами. Осуществляется оценка рисков при строительстве и эксплуатации.

Заключение

Объективная необходимость модернизации энергетической инфраструктуры арктических регионов обуславливает реальные перспективы использования высокого потенциала АСММ, которые в качестве автономных источников энергии в определенных условиях могут быть конкурентоспособными по сравнению с традиционными энергоисточниками. Подземное размещение атомных станций с целью повышения уровня безопасности окружающей среды определяет требования к подземному комплексу АСММ как элементу сложной природно-технической геосистемы «массив горных пород — технология строительства — подземное сооружение».

В статье кратко рассмотрены некоторые задачи этапа комплексных исследований, который направлен на разработку методических подходов при формировании основных положений методологии создания подземных комплексов АСММ. Полученные результаты служат основой для дальнейшего развития исследований, направленных, в частности, на оценку взаимовлияния и взаимосвязей между элементами природно-технической геосистемы. Решение этой задачи является неотъемлемым этапом разработки научно обоснованных рекомендаций, направленных на обеспечение надежности, безопасности и эффективности реализации инженерно-технических и технологических решений по созданию подземных комплексов АСММ в условиях криолитозоны арктических регионов.

Исследования выполнены в Горном институте Кольского научного центра РАН в рамках бюджетной темы 0232-2014-0027 «Разработка научных основ и методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности (АСММ) в условиях Арктики» (научные руководители академик РАН Н. Н. Мельников и доктор технических наук В. П. Конухин).

Литература

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. — Утв. Президентом РФ 8 февраля 2013 г. № Пр-232. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/499002465>.
2. Адамов Е. О. Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания. — URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf>.
3. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Наука, 2011. — 375 с.
4. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. — Т. 2 / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Академ-Принт, 2015. — 387 с.
5. Наумов В. В., Никулькина И. В. Особенности развития Российской Арктики. — URL: <http://sdo.rea.ru/cde/conference/3/file.php?fileId=54>.
6. Проект «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года». — URL: http://narfu.ru/aan/institut_arctic/strategy_AZRF_2010.pdf.

7. Воронин Н. И., Санеев Б. Г., Иванова И. Ю., Ижбулдин А. К. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. — Т. 2 / Под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. — М.: Академ-Принт, 2015. — С. 59—71.
8. Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Ижбулдин А. К., Симоненко А. Н. Освоение минерально-сырьевых ресурсов Севера: варианты энергоснабжения // Регион: экономика и социология. — 2011. — № 4. — С. 187—199.
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. Ядерная энергетика. — 2018. — № 1. — С. 75—86.
10. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору «Об утверждении заключения государственной экологической экспертизы проекта “Реконструкция здания 5 на ФГУП “АТОМФЛОТ” под хранилище контейнерного типа для хранения (до 50 лет) неперерабатываемого отработавшего ядерного топлива атомного ледокольного флота”» от 28 февраля 2005 г. № 118. — URL: docs.cntd.ru/document/901950066.
11. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. и др. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском Севере России. — Апатиты: КНЦ РАН, 2010. — 305 с.
12. Наумов В. А., Рубин И. Е., Днепровская Н. М. и др. Описание ослабления нейтронов в биологической защите методом вероятностей прохождения: Препринт ИПЭ-17 / Ин-т проблем энергетики АН Беларуси. — Минск, 1996. — 28 с.
13. Наумов В. А., Рубин И. Е., Днепровская Н. М. Программный комплекс КРАТЕР для расчета нейтронно-физических характеристик тепловых ядерных реакторов: Препринт ИПЭ-14 / Ин-т проблем энергетики АН Беларуси. — Минск, 1996. — 39 с.
14. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>.
15. Фельдман Г. М. Методические указания по расчетам температурного режима грунтов. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. — 70 с.
16. Амосов П. В., Новожилова Н. В. Аналитическая оценка теплового воздействия заглубленной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Вестн. МГТУ. — 2013. — Т. 16, № 4. — С. 638—640.
17. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Новожилова Н. В., Климин С. Г. Экология подземных объектов ядерной энергетики в условиях криолитозоны. — Ярославль: ООО «Принтхаус-Ярославль», 2015. — 119 с.
18. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Гусак С. А. и др. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1 (13). — С. 30—37.
19. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г. Результаты численного моделирования теплового состояния криолитозоны при эксплуатации многомодульной подземной атомной станции малой мощности // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 82—90.
20. Иудин М. М. Геомеханическая модель оценки механических свойств мерзлых горных пород в массиве // Вестн. ЯГУ. — 2008. — Т. 5, № 2. — С. 40—45.
21. Корчак А. В. Методология проектирования строительства подземных сооружений // Научное обоснование подземного строительства: Избранные труды ученых Московского государственного горного университета. — М.: Академия горных наук, 2001. — С. 197—227.
22. Орлов А. О., Смирнов Ю. Г. Обоснование эффективных способов размещения подземных комплексов атомных станций малой мощности в российской Арктике // Изв. вузов. Горный журн. — 2016. — № 4. — С. 18—23.
23. Орлов А. О., Смирнов Ю. Г., Гусак С. А. Основные методические принципы обеспечения безопасности строительства подземных комплексов атомных станций малой мощности в условиях российской Арктики // Изв. вузов. Горный журн. — 2017. — № 5. — С. 31—38.
24. Смирнов Ю. Г., Орлов А. О. Анализ мирового опыта строительства подземных атомных станций и оценка возможности его использования для арктических регионов России // Вестн. МГТУ. — 2016. — Т. 19, № 1/1. — С. 47—52.
25. Смирнов Ю. Г., Орлов А. О. Многобарьерная система безопасности при строительстве и эксплуатации подземных атомных станций малой мощности в условиях Российской Арктики // Вестн. КНЦ РАН. — 2017. — № 1. — С. 93—98.

Информация об авторах

Мельников Николай Николаевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель института, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24).

Гусак Сергей Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: gusnat52@mail.ru.

Новые технологии освоения Арктики

Амосов Павел Васильевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

Наумов Вадим Алексеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru.

Наумов Андрей Вадимович, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: naumovandreyvadimovich@yahoo.com.

Орлов Александр Орестович, научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru.

Климин Сергей Гарольдович, ведущий технолог, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: klimin@goi.kolasc.net.ru.

Смирнов Юрий Геннадьевич, научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 24), e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Мельников Н. Н., Гусак С. А., Амосов П. В. и др. Исследования по обоснованию методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 123—136. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-123-136.

VERIFICATION STUDIES ON A METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING UNDERGROUND COMPLEXES TO DISPOSE SMALL NUCLEAR POWER PLANTS IN THE ARCTIC CONDITIONS

Melnikov N. N., Gusak S. A., Amosov P. V., Naumov V. A., Naumov A. V., Orlov A. O., Klimin S. G., Smirnov Yu. G. Mining Institute Kola Science Centre RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Studies have been performed by the Mining Institute KSC RAS within the budget theme 0232-2014-0027 “Development of scientific foundations and a methodology for constructing the underground complexes to dispose small nuclear power plants (SNPP) under the Arctic conditions” (research leaders: academician N. N. Melnikov, professor V. P. Konukhin).

Abstract

The remote Russian Arctic territories containing significant national mineral resources are experiencing an acute lack of energy for the development. Almost absent or underdeveloped energy infrastructure is one of the main reasons why, in particular, promising projects for the development of unique gold, non-ferrous and rare-earth metal deposits are still not implemented. A real feasible solution to the problem of energy supply to remote areas is the use of small nuclear power plants (SNPP) as autonomous energy sources. The need to provide consumers with autonomous energy sources to causes additional requirements to reduce the risks of SNPP's radiation impact on the environment and population. The integrated safety of nuclear energy sources, including the localization of possible internal incidents and protection from external dynamic man-made and natural effects, can be ensured with the underground deployment of reactor plants. The article presents the results of integrated studies on the development of scientific and engineering foundations for construction of underground complexes to deploy small nuclear power plants in the Russian Arctic rock formations. The prerequisites for using the SNPPs to ensure the energy security of remote and hard-to-reach territories of Russia's Arctic regions are briefly considered. On the basis of numerical modeling of physical processes associated with the operation of underground small nuclear power plants, the methodological approaches have been tested and recommendations have been formulated to optimize the design and volume-layout solutions of underground complexes. Based on the solution of problems related to the development of structural and volume-layout models of chamber workings for the placement of the main SNPP equipment, the methodology framework for the constructing of the underground complexes in the Arctic regions is formulated.

Keywords: Arctic regions, permafrost zone, underground complexes, small nuclear power plants, spent nuclear fuel, thermal effects.

References

1. Strategiya razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2020 goda. [The development strategy of the Arctic zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2020]. Utv. Prezidentom RF 8 fevralya 2013 g. no. Pr-232. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499002465>. (In Russian).
2. Adamov E. O. Sostoyanie razrabotok ASMM v mire i Rossii, priority i perspektivy ikh sozdaniya. [Development status of SNPP in the world and Russia, priorities and prospects of their creating]. Available at: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf>. (In Russian).
3. Atomnye stantsii maloi moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki. [Low-power Nuclear Power Plants — a New Line in the Development of Power Systems]. Pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. Moscow, Nauka, 2011, 375 p. (In Russian).
4. Atomnye stantsii maloi moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki. [Low-power Nuclear Power Plants — a New Line in the Development of Power Systems]. Vol. 2. Pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. Moscow, Akadem-Print, 2015, 387 p. (In Russian).
5. Naumov V. V., Nikul'kina I. V. Osobennosti razvitiya Rossiiskoi Arktiki. [Development features of the Russian Arctic]. Available at: <http://sdo.rea.ru/cde/conference/3/file.php?fileId=54>. (In Russian).
6. Proekt "Strategii razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2020 goda". [The project of "The development strategy of the Arctic zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2020"]. Available at: http://narfu.ru/aan/institut_arctic/strategy_AZRF_2010.pdf. (In Russian).
7. Voropai N. I., Saneev B. G., Ivanova I. Yu., Izhbuldin A. K. Sravnitel'naya effektivnost' ispol'zovaniya atomnykh stantsii maloi moshchnosti v lokal'nykh energosistemakh na vostoке Rossii. [Comparative efficiency of the use of low_capacity nuclear power plants in the local power systems in Eastern Russia]. Atomnye stantsii maloi moshchnosti: novoe napravlenie razvitiya energetiki. Vol. 2. Pod red. akad. RAN A. A. Sarkisova. Moscow, Akadem-Print, 2015, pp. 59—71. (In Russian).
8. Ivanova I. Yu., Tuguzova T. F., Izhbuldin A. K., Simonenko A. N. Osvoenie mineral'no-syr'evykh resursov Severa: varianty energosnabzheniya. [Mineral resources development of the North: energy supply options]. Region: ekonomika i sotsiologiya, 2011, no. 4, pp. 187—199. (In Russian).
9. Naumov V. A., Gusak S. A., Naumov A. V. Atomnye stantsii maloi moshchnosti dlya energosnabzheniya arkticheskikh regionov: otsenka radioaktivnosti otrabotavshogo yadernogo topliva. [Small nuclear power plants for power supply to the Arctic regions: spent nuclear fuel radioactivity assessment]. Izv. vuzov. Yad. energetika, 2018, no. 1, pp. 75—86. (In Russian).
10. Prikaz Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru "Ob utverzhdenii zaklyucheniya gosudarstvennoi ekologicheskoi ekspertizy proekta "Rekonstruktsiya zdaniya 5 na FGUP "ATOMFLOT" pod khranilishche konteinerenogo tipa dlya khraneniya (do 50 let) nepererabatyvaemogo otrabotavshogo yadernogo topliva atomnogo ledokol'nogo flota" ot 28 fevralya 2005 g. no. 118. Available at: docs.cntd.ru/document/901950066. (In Russian).
11. Mel'nikov N. N., Konukhin V. P., Naumov V. A. et al. Nauchnye i inzhenernye aspekty bezopasnogo khraneniya i zakhroneniya radiatsionno opasnykh materialov na evropeiskom Cevere Rossii. [Scientific and engineering aspects for safe storage and disposal of radiation-hazardous materials in European north of Russia]. Apatity, KNTs RAN, 2010, 305 p. (In Russian).
12. Naumov V. A., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M. et al. Opisanie oslableniya neitronov v biologicheskoi zashchite metodom veroyatnostei prokhozheniya. [The description of the attenuation of neutrons in the biological protection by the method of probability of passing]. Preprint IPE-17. In-t problem energetiki AN Belarusi, 1996, 28 p. (In Russian).
13. Naumov V. A., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M. Programnyi kompleks KRATER dlya rascheta neitronofizicheskikh kharakteristik teplovykh yadernykh reaktorov. [Software complex KRATER for calculation of neutron-physical characteristics of thermal nuclear reactors]. Preprint IPE-14. In-t problem energetiki AN Belarusi. Minsk, 1996, 39 p. (In Russian).
14. Normy radiatsionnoi bezopasnosti NRB-99/2009. [Radiation safety standards NRB-99/2009]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>. (In Russian).
15. Fel'dman G. M. Metodicheskie ukazaniya po raschetam temperaturnogo rezhima gruntov. [Guidelines for the calculations of temperature regime of soils]. Yakutsk, In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1985, 70 p. (In Russian).
16. Amosov P. V., Novozhilova N. V. Analiticheskaya otsenka teplovogo vozdeistviya zaglublennoi atomnoi stantsii maloi moshchnosti na mnogoletnemerzlye gornye porodы. [Analytical evaluation of thermal impact of subsurface small nuclear power plant on the permafrost rocks]. Vestn. MGTU, 2013, vol. 16, no. 4, pp. 638—640. (In Russian).
17. Mel'nikov N. N., Amosov P. V., Novozhilova N. V., Klimin S. G. Ekologiya podzemnykh ob"ektov yadernoi energetiki v usloviyakh kriolitozony. [Ecology of underground nuclear power facilities under permafrost conditions]. Yaroslavl, OOO "Printkhaus-Yaroslavl", 2015, 119 p. (In Russian).
18. Mel'nikov N. N., Amosov P. V., Gusak S. A. et al. Otsenka teplovogo vozdeistviya podzemnoi atomnoi stantsii maloi moshchnosti na mnogoletnemerzlye gornye porodы. [Evaluation of thermal action of underground

nuclear low-power station on the permafrost rocks]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2014, no. 1 (13), pp. 30—37. (In Russian).

19. *Mel'nikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G.* Rezul'taty chislennogo modelirovaniya teplovogo sostoyaniya kriolitozony pri ekspluatatsii mnogomodul'noi podzemnoi atomnoi stantsii maloi moshchnosti. [Numerical modeling results of cryolithic zone's thermal state while exploiting an underground multi-module small nuclear power plant]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 2 (26), pp. 82—90. (In Russian).

20. *Iudin M. M.* Geomekhanicheskaya model' otsenki mekhanicheskikh svoystv merzlykh gornyykh porod v massive. [Geo-mechanical model of evaluation of mechanical properties of frozen rocks in massif]. *Vestn. YaGU*, 2008, vol. 5, no. 2, pp. 40—45. (In Russian).

21. *Korchak A. V.* Metodologiya proektirovaniya stroitel'stva podzemnykh sooruzhenii. [Methodology for the design of underground structures]. *Nauchnoe obosnovanie podzemnogo stroitel'stva: Izbrannye trudy uchenykh Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. Moscow, Akademiya gornyykh nauk, 2001, pp. 197—227. (In Russian).

22. *Orlov A. O., Smirnov Yu. G.* Obosnovanie effektivnykh sposobov razmeshcheniya podzemnykh kompleksov atomnykh stantsii maloi moshchnosti v rossiiskoi Arktike. [Substantiation of efficient ways of placing

underground complexes of small nuclear power plants in the Russian Arctic]. *Izv. vuzov. Gornyi zhurn*, 2016, no. 4, pp. 18—23. (In Russian).

23. *Orlov A. O., Smirnov Yu. G., Gusak S. A.* Osnovnye metodicheskie printsipy obespecheniya bezopasnosti stroitel'stva podzemnykh kompleksov atomnykh stantsii maloi moshchnosti v usloviyakh rossiiskoi Arktiki. [Basic methodological principles for ensuring the safe construction of underground complexes of small nuclear power plants in the Russian Arctic]. *Izv. vuzov. Gornyi zhurn*, 2017, no. 5, pp. 31—38. (In Russian).

24. *Smirnov Yu. G., Orlov A. O.* Analiz mirovogo opyta stroitel'stva podzemnykh atomnykh stantsii i otsenka vozmozhnosti ego ispol'zovaniya dlya arkticheskikh regionov Rossii. [Analysis of the world experience in the construction of underground nuclear power plants and assessment of the possibility of its use for the Arctic regions of Russia]. *Vestn. MG TU*, 2016, vol. 19, no. 1/1, pp. 47—52. (In Russian).

25. *Smirnov Yu. G., Orlov A. O.* Mnogobar'ernaya sistema bezopasnosti pri stroitel'stve i ekspluatatsii podzemnykh atomnykh stantsii maloi moshchnosti v usloviyakh Rossiiskoi Arktiki. [Multi-barrier safety system for construction and exploitation of underground small nuclear power plants under the Russian Arctic conditions]. *Vestn. KNTs RAN*, 2017, no. 1, pp. 93—98. (In Russian).

Information about the authors

Melnikov Nikolay Nikolayevich, Academician RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Research Director, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia).

Gusak Sergey Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Leading researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: gusnat52@mail.ru.

Amosov Pavel Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Leading researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

Naumov Vadim Alekseyevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: naumovva@goi.kolasc.net.ru.

Naumov Andrey Vadimovich, Senior researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: naumovandreyvadimovich@yahoo.com.

Orlov Alexander Orestovich, Researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru.

Klimin Sergey Garoldovich, Leading technologist, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: klimin@goi.kolasc.net.ru.

Smirnov Yuriy Gennadyevich, Researcher, Mining Institute of the Kola Science Center RAS (24, Fersman st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia), e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru.

Bibliographic description of the article

Melnikov N. N., Gusak S. A., Amosov P. V., Naumov V. A., Naumov A. V., Orlov A. O., Klimin S. G., Smirnov Yu. G. Verification studies on a methodology for constructing underground complexes to dispose small nuclear power plants in the Arctic conditions. *Arctic: ecology and economy*. 2018, no. 3 (31), pp. 123—136. DOI:10.25283/2223-4594-2018-3-123-136. (In Russian).

© Melnikov N. N., Gusak S. A., Amosov P. V., Naumov V. A., Naumov A. V., Orlov A. O., Klimin S. G., Smirnov Yu. G., 2018