

УДК 621.039:622(985)

МЕТОДОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Н. Н. МЕЛЬНИКОВ, академик РАН**С. А. ГУСАК**, заведующий лабораторией, канд. техн. наук, доцент, gusnat52@mail.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Общие тенденции и опыт развития мировой энергетики все более убедительно свидетельствуют об отсутствии разумной альтернативы атомным станциям (АЭС). Однако ряд тяжелых аварий, которые произошли на объектах атомной энергетики, с одной стороны, в определенной степени подорвали доверие к атомным источникам энергии, а с другой – способствовали настойчивому поиску эффективных путей повышения безопасности при эксплуатации объектов с ядерными технологиями. Такой поиск сопровождается решением широкого спектра научно-технических задач, включая разработку принципиально новых конструкций реакторных установок и систем безопасности, а также совершенствование управления ядерно-энергетическими объектами.

Несомненно, новое поколение реакторных установок, которые являются результатом разработок, выполненных в различных странах мира, характеризуется более высоким уровнем безопасности по сравнению со своими предшественниками и прототипами. Вместе с тем нельзя утверждать об абсолютной безопасности даже атомных станций, оснащенных реакторами нового поколения с присущими им свойствами самозащитенности. Такие свойства, в частности, характерны для современных реакторных установок малой мощности интегрального типа. Наличие сложных и взаимосвязанных систем, включая гидравлические системы, не позволяют полностью исключить вероятность аварии на атомных станциях. Анализ аварийных ситуаций на ядерных объектах позволяет говорить также о существенном влиянии человеческого фактора на вероятность возникновения внутренних инцидентов, которые могут проявляться при нарушении персоналом технологии управления радиационно опасным объектом. Важными факторами, оказывающими влияние на риски развития аварийных ситуаций, являются внешние динамические воздействия при стихийных бедствиях (землетрясения, цунами, тайфуны и др.), воздействия техногенного характера (падение самолета, крупные технологические катастрофы на близлежащих промышленных объектах и др.) и террористические акты, ставящие своей целью повреждение реакторных установок с выбросом радиоактивных веществ.

Анализ результатов многолетних исследований в различных странах и опыта эксплуатации подземных объектов различного

Изложены основные направления комплексных исследований по проблеме использования подземного пространства для размещения атомных станций, выполненных Горным институтом Кольского научного центра РАН в различные периоды времени.

Ключевые слова: подземное пространство, атомные станции малой мощности, подземные комплексы, арктические регионы, криолитозона, тепловые воздействия, безопасность, методология.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.14

назначения позволяет сделать вывод, что комплексная безопасность атомных станций, включая локализацию вероятных внутренних инцидентов, решение задачи физической защиты и защиты от внешних воздействий техногенного и природного характера может быть гарантированно обеспечена при подземном размещении реакторных установок.

Следует отметить, что анализ и обобщение результатов исследований по проблеме создания подземных атомных станций является одной из основных целей деятельности Комиссии по подземным атомным станциям, созданной в рамках Международного общества по механике горных пород (ISRM) [1].

В настоящей статье представлены некоторые результаты комплексных научно-исследовательских разработок, выполненных Горным институтом Кольского научного центра РАН (далее – Горный институт) по проблеме создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности (АСММ) в арктических регионах России.

Рассмотрение этих работ предвещает краткое описание основных направлений исследований, которые проводились в рамках обоснования концепции создания головных подземных атомных станций (ПАС) в СССР. На базе этих исследований формировался научно-технический потенциал специалистов Горного института в области изучения физико-технических и инженерно-геологических проблем использования подземного пространства для размещения объектов атомной энергетики, в том числе в арктических регионах России.

Научно-исследовательские работы в рамках государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика»

В конце 1980 – и начале 1990-х годов Горным институтом (научный куратор по горнотехническому комплексу подземной станции) при сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими и технологическими организациями страны были выполнены комплексные научные и проектные

разработки, направленные на обоснование концепции создания головных ПАС в рамках государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика». Основное внимание в этих работах уделено исследованиям особенностей обеспечения безопасности ПАС с реакторными установками различного типа и мощности [2, 3].

Построенные в 1960-х годах в ряде стран ПАС и исследовательские реакторы удовлетворяли частным требованиям к внешним воздействиям, исходя из специфики реактора, задач станции и военно-политической обстановки того времени. Многочисленные проектно-конструкторские разработки для ПАС, выполненные в различных странах в 1970–1980-х годах, также вели по индивидуальным требованиям к внешним воздействиям. При этом характеристики таких воздействий носили, как правило, качественный характер [4, 5]. В рамках обоснования концепции головных ПАС рассмотрен более широкий спектр вероятных воздействий, включая воздействия от диверсий, террористических актов и локальных военных конфликтов, в том числе с использованием высокоточных средств поражения. Результаты исследований позволили сделать вывод, что массивы горных и прежде всего скальных пород мощностью 50 м и более представляют собой исключительно надежные защитные барьеры, выдерживающие нагрузки на несколько порядков больше, чем любые инженерные защитные конструкции наземных атомных станций. Также установлено снижение интенсивности сейсмических воздействий на сооружения ПАС по сравнению с наземным расположением. Это преимущество ПАС подтверждалось практически всеми исследованиями, выполненными в ряде стран (США, Канада, Япония).

Другая ограниченность проработок ПАС в 1970-х годах была связана с неопределенностью в понимании специфики теплового влияния объекта на конструкции и вмещающий породный массив. Вместе с тем опыт эксплуатации отечественной ПАС показал, что учет теплового фактора даже при нормальной эксплуатации может приводить к ошибкам в прогнозировании напряженно-деформированного состояния породного массива и условий работы конструкций [6]. Поэтому изучение теплового фактора в исследованиях Горного института выдвигалось в качестве одной из основных научно-технических задач, решение которой должно служить цели обоснования требований к конструкциям подземной АС и массиву горных пород, а также оптимизации объемно-компоновочных решений. Результаты исследований позволили сделать вывод, что скальный массив может воспринимать без разрушений значительные нагрузки при различных воздействиях даже в условиях тяжелой внутренней аварии (высокая температура среды, паровые взрывы и горение водорода) при сохранении устойчивости реакторной выработки.

Научные основы и методология создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики

Современная широкомасштабная атомная энергетика, история развития которой связана с повышением единичной мощности энергоблоков, характеризуется концентрацией больших реакторных мощностей в относительно небольшом числе региональных энергетических систем [7]. Вместе с тем слабо развитая

энергетическая инфраструктура на многих удаленных и труднодоступных территориях диктует настоятельную потребность в обеспечении энергетической безопасности таких территорий на основе автономных источников энергии, способных обеспечить гибкое и эффективное производство энергии для различных нужд [7–9]. В особой степени актуальность проблемы развития локальной энергетики на основе использования таких энергоисточников проявляется для удаленных территорий арктических регионов России, где роль малой энергетики в обеспечении энергетической безопасности является определяющей [10].

На сегодня научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями Госкорпорации «Росатом» предложен широкий спектр проектов атомных станций малой мощности, которые могут быть использованы для энергообеспечения разработки перспективных месторождений полезных ископаемых и других объектов в арктических регионах России [11–13]. Использование АСММ в качестве автономных источников энергии и целесообразная необходимость их приближения к потребителям энергии обуславливают дополнительные требования по снижению рисков радиационного воздействия атомных энергоисточников на окружающую среду и население. Как отмечалось ранее, в совокупности с барьерами безопасности, предусмотренными в современных разработках реакторных установок, комплексная безопасность АСММ может быть гарантированно обеспечена при подземном размещении реакторных установок, основная идея которого заключается в использовании защитных и изолирующих свойств породного массива.

В общем случае обеспечение устойчивости этого массива является одной из наиболее сложных задач при проектировании подземных сооружений. Особое значение данная проблема приобретает в условиях взаимодействия подземного комплекса АСММ с многолетнемерзлыми горными породами (ММГП). В частности, тепловое воздействие, обусловленное температурным режимом эксплуатации подземной АСММ, может приводить к изменению физико-механических свойств ММГП, активизации геомеханических процессов и потере устойчивости подземных сооружений. Междисциплинарный характер проблемы создания подобных объектов в арктических условиях мотивировал развертывание в Горном институте комплексных научных исследований, направленных на обоснование безопасного размещения АСММ в условиях Арктики.

Первый этап этих исследований включал выработку концепции строительства подземных АСММ для энергообеспечения вновь создаваемых горнопромышленных предприятий в труднодоступных регионах России на примере перспективных месторождений твердых полезных ископаемых в Якутии, Иркутской области и на Чукотке. В рамках этих исследований рассмотрен ряд научно-технических вопросов: выбор и оценка площадок для размещения АСММ; выбор реакторных установок; обоснование технологии строительства подземных АСММ; обеспечение их тепловой, радиационной и экологической безопасности.

Дальнейшее развитие исследований было направлено на разработку научных и инженерных основ создания подземных комплексов АСММ и обоснования методологии строительства подземных АСММ в арктических регионах России. В рамках этих исследований решены несколько научных задач:



Рис. 1. Критерии для выбора и обоснования технологических решений при создании подземных комплексов АСММ

• на основе анализа проблемы энергообеспечения и перспектив развития энергетической инфраструктуры удаленных и труднодоступных территорий арктических регионов России определены области возможного применения АСММ и выполнена предварительная оценка приоритетности инновационных проектов АСММ;

• на базе математического моделирования физических процессов при эксплуатации подземных АСММ разработаны и апробированы методические подходы для обоснования рекомендаций, направленных на сохранение криогенного состояния вмещающего породного массива и обеспечение ядерной, радиационной и тепловой безопасности долговременного хранения отработавшего ядерного топлива АСММ различного типа;

• на основе решения задач, связанных с разработкой моделей камерных выработок для размещения основного оборудования АСММ, сформированы основные принципы и методические подходы, на которых базируются концептуальные положения методологии создания подземных комплексов АСММ в условиях Арктики.

Основные результаты этих исследований опубликованы в ряде работ [14–17]. На основе анализа и обобщения результатов исследований, а также опыта эксплуатации подземных объектов различного назначения разработана система критериев для обоснования технологических решений, позволяющих обеспечить устойчивость и долговечность горных выработок и строительных конструкций подземных АСММ в условиях криолитозоны (**рис. 1**).

К основным критериям относятся: рельеф местности в районе строительства; глубина заложения и способ доступа к комплексу; физико-механические свойства горных пород; характер протекающих геомеханических и тектонических процессов; гидрогеологический режим. Технические характеристики комплекса связаны с используемым типом оборудования и параметрами горных выработок для них. Конструктивно-компоновочные решения подземного комплекса определяются целевым назначением АСММ и должны обеспечить длительную устойчивость подземных сооружений в течение всего срока эксплуатации. Выработки подземного комплекса ориентируют по функционально-технологическому принципу работы, направленному на максимальное сближение объектов, имеющих при эксплуатации технологические связи, отдавая

предпочтение отдельному размещению выработок реакторной группы. В работе [17] приведены результаты экспертной оценки рациональности компоновки подземного комплекса АСММ по различным критериям (аварийная эвакуация, геомеханические условия, пересечение транспортных и камерных выработок, транспортные схемы, удельный объем горных работ, тип основного оборудования, решения по вентиляции). На примере наиболее характерных схем компоновок подземного комплекса, которые объединены в группы по принципу взаимного расположения основных камерных выработок, сформулированы рекомендации по использованию отдельных компоновочных схем для размещения основного оборудования реакторных установок различной мощности.

Особое значение отводится критериям, которые направлены на обеспечение безопасности, и среди которых важную роль в условиях криолитозоны приобретают критерии тепловой безопасности. Объективная значимость этого фактора обуславливает актуальность изучения теплового взаимодействия подземного комплекса АСММ с вмещающим породным массивом, которое является одним из основных предметов комплексных исследований, проводимых в Горном институте. В качестве примера на **рис. 2** приведены результаты численного моделирования процесса теплопереноса в породном массиве с учетом фазового перехода «лед – вода» при размещении в массиве ММГП многомодульной подземной АСММ.

Очевидно, что при прочих равных условиях интенсивность теплового взаимодействия АСММ с породным массивом в значительной степени определяется температурным режимом эксплуатации различных выработок подземного комплекса. В рамках решения задачи по определению этого параметра исследованы, в частности, закономерности образования источников тепла в подземных модулях хранилищ контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторных установок АСММ различного типа: АБВ-БЗ, УНИТЕРМ, РИТМ-200М, СВБР-10 и СВБР-100. В рамках концепции хранения облученного топлива в металлобетонных контейнерах в течение всего срока службы реакторных установок определена динамика мощности остаточных энерговыделений (МОЭ) в хранилищах ОЯТ

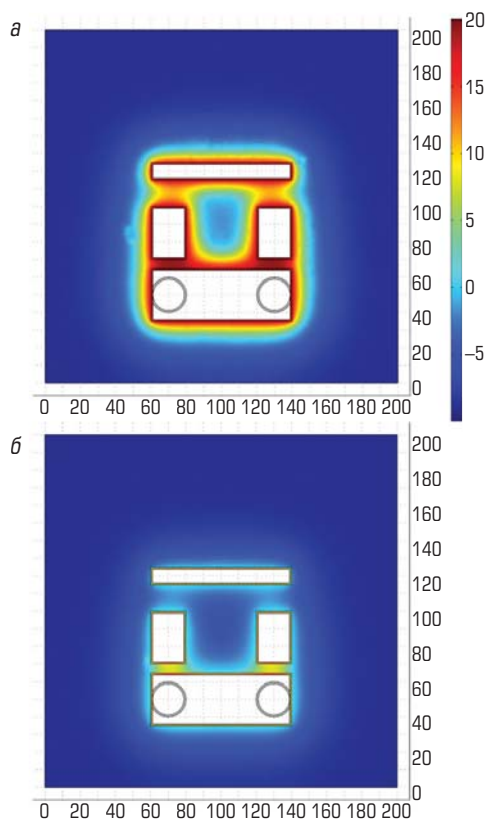


Рис. 2. Температурное поле во вмещающем породном массиве после 5 лет теплового воздействия многомодульной подземной АСММ (температура внутренней среды модулей 20 °С) при пористости ММГП 10 % и величине коэффициента теплопроводности обделки подземных модулей 2 Вт/(м·К) (а) и 0,1 Вт/(м·К) (б) [14]

в период эксплуатации АСММ. Эти исследования базировались на данных по радионуклидному составу ОЯТ, которые были получены по результатам математического моделирования топливных циклов активных зон реакторов [16]. В качестве примера на **рис. 3** приведены результаты оценки динамики МОЭ для модулей хранилищ ОЯТ, образующегося при эксплуатации реакторных установках АБВ-63 и СВБР-100.

Несомненно, температурный режим породного массива является одним из основных факторов, определяющих особенности строительства и эксплуатации подземных комплексов АСММ в условиях криолитозоны. Вместе с тем наличие многообразных факторов, которые оказывают влияние на устойчивость подземных сооружений, обуславливает необходимость учета тесной взаимосвязи этих факторов для обеспечения безопасного функционирования природной геотехнической системы «породный



Рис. 3. Динамика мощности остаточного энергосвечения в контейнерном хранилище ОЯТ реакторных установок АБВ-63 (а) и СВБР-100 (б)

массив – технология подземного строительства – подземное сооружение» как на стадии строительства, так и в условиях длительной эксплуатации подземного объекта. Тесная взаимосвязь между элементами геосистемы приводит к тому, что риск нарушения функционирования любого ее элемента может привести к нарушению функционирования всей системы [18]. Поэтому одной из основных задач дальнейших исследований является определение требований и обоснование технологии строительства подземных комплексов АСММ, оказывающей влияние на взаимодействие подземных сооружений и вмещающего породного массива на всем протяжении жизненного цикла атомно-энергетического объекта.

Заключение

Объективная необходимость модернизации и развития энергетической инфраструктуры арктических регионов России создает реальные предпосылки для практического внедрения современных разработок атомных станций малой мощности.

Комплексными исследованиями, выполненными в Горном институте КНЦ РАН, заложены научные основы использования подземного пространства для обеспечения гарантированного уровня безопасности атомных энергоисточников и повышения эффективности их использования для энергоснабжения горнопромышленных объектов, создаваемых по программе экономического развития удаленных и труднодоступных территорий российской Арктики.

Благодарим ведущих научных сотрудников: канд. техн. наук П. В. Амосова и канд. физ.-мат. наук В. А. Наумова, а также научных сотрудников А. О. Орлова и Ю. Г. Смирнова, предоставившим отдельные результаты исследований в рамках государственных заданий по темам 0232-2014-0027 и 0226-2018-0008_ГоИ, выполненных в Горном институте под научным руководством академика Н. Н. Мельникова.

Библиографический список

1. Introduction to ISRM / International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. URL: <https://www.isrm.net/gca/?id=141> (дата обращения: 17.10.2018).
2. Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики : матер. Междунар. конф. / под ред. Н. Н. Мельникова. – Апатиты : КНЦ РАН, 1995. Ч. 1, 2. – 360 с.
3. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. Подземные атомные станции. – Апатиты : КНЦ АН СССР, 1991. – 136 с.
4. Мостков В. М., Кириллов А. П., Николаев Ю. Б., Богопольский В. Г. Проектирование и строительство подземных атомных электростанций: обзорная информация. – М. : Информэнерго, 1985. – 68 с.
5. Lindbo T., Oberth R. C. Nuclear Power Plants Underground // ISRM International Symposium. – Stockholm, 1980.

6. Зверев А. Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземных атомных электростанций // *Атомная энергия*. 1988. Т. 64. № 4. С. 150–163.
7. Саркисов А. А. Вступительная статья председателя Программного комитета конференции // *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики* : сб. ст. – М. : Академ-Принт, 2015. Т. 2. С. 7–9.
8. IAEA-TECDOC-1785. Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident / IAEA, 2016. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1785_web.pdf (дата обращения: 19.04.2019).
9. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment / OECD, 2016. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264266865-en> (дата обращения: 15.12.2018).
10. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года : утв. Президентом РФ. URL: <http://static.government.ru/media/files/2Rp5A3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf> (дата обращения: 15.04.2019).
11. Адамов Е. О. Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания / Росатом. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf> (дата обращения: 15.11.2018).
12. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System. 2018 Edition / IAEA, 2018. URL: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf (дата обращения: 20.04.2019).
13. The Methodology of Cost Estimation for Decommissioning Nuclear Facilities in the Russian Federation. International Expert Feedback on the Methodology Developed by ROSATOM : Final Report / OECD, 2018. URL: <https://oecd-nea.org/globalsearch/download.php?doc=80248>(дата обращения: 16.04.2019).
14. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г., Новожилова Н. В. Экологические аспекты безопасности подземной атомной станции малой мощности в условиях Арктики. – Ярославль : ООО «Принтхаус-Ярославль», 2018. – 170 с.
15. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А., Гусак С. А. Реакторные установки для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов: проблема выбора // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2015. Т. 18. № 2. С. 198–208.
16. Наумов В. А., Гусак С. А., Наумов А. В. Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2018. № 1. С. 75–86.
17. Орлов А. О., Смирнов Ю. Г. Оценка конструктивно-компоновочных решений подземных комплексов для атомных станций малой мощности в арктических регионах России // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 4. С. 29–34.
18. Корчак А. В. Методология проектирования строительства подземных сооружений. – М. : Недра коммюникейшнс, 2001. – 416 с. **РЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 96–100
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.14

The methodology for using underground space to place small nuclear power plants in the arctic conditions

Information about authors

N. N. Melnikov¹, Academician of the Russian Academy of Sciences

S. A. Gusak¹, Head of Laboratory, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, gusnat52@mail.ru

¹ Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

General trends and experience in the development of world energy demonstrate absence of reasonable alternative to nuclear power plants. At the same time, the severe accidents that had occurred at nuclear facilities clearly show that a necessary condition for the nuclear power development is the unconditional guaranteed safety of nuclear power plants for the environment and population.

For this purpose, most countries having nuclear power plants are extensively solving the task of nuclear power plants safety—from the development of principally new reactor designs and safety systems to the general improvement of the nuclear power management. The approach based on the use of underground space for the placement of nuclear power plants takes a certain part in the studies. The approach was formed as a scientific and engineering direction on the basis of experience in operation of underground nuclear power plants built in different countries in the 1960s.

The article describes the main directions of integrated studies into the problem of underground space use for placing nuclear power plants, carried out by the Mining Institute KSC RAS in different periods. The studies performed at the turn of the 1980–1990s in collaboration with academic and industrial institutions were aimed at substantiating the concept of the parent underground nuclear power plants in the Soviet Union. The study results showed that utilization of the protective and insulating properties of rock masses ensures safety of both the environment and underground nuclear power plants.

In recent years, the Mining Institute has been carrying out research aimed at developing a methodology to construct underground systems for placing small nuclear power plants in the Arctic conditions. This article describes the main study directions and presents some research results on the development of methodical approaches to substantiation of construction technologies for underground small nuclear power plants in the permafrost.

The authors would like to express their thanks to Leading Researchers Candidate of Engineering Sciences P. V. Amosov and Candidate of Physico-Mathematical Sciences V. A. Naumov, as well as Researchers A. O. Orlov and Yu. G. Smirnov for providing some research findings obtained in the studies accomplished under the scientific guidance by Academician N. N. Melnikov at the Institute of Mining, State Contracts Nos. 0232–2014–0027 and 0226–2018–0008_Gol.

Keywords: underground space, small nuclear power plants, underground systems, Arctic regions, permafrost, thermal impacts, safety, methodology.

References

1. Introduction to ISRM. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. Available at: <https://www.isrm.net/gca/?id=141> (accessed: 17.10.2018).

2. Melnikov N. N. (Ed.). Use of underground space to enhance safety of atomic power engineering in the country : *International Conference Proceedings*. Apatity : KNTs RAN, 1995. Iss. 1, 2. 360 p.
3. Melnikov N. N., Konukhin V. P., Naumov V. A. Undergroun nuclear power-generating plants. Apatity : KNTs AN SSSR, 1991. 136 p.
4. Mostkov V. M., Kirillov A. P., Nikolaev Yu. B., Bogopolsky V. G. Design engineering and construction of underground nuclear power plants: Review. Moscow : Informenergy, 1985. 68 p.
5. Lindbo T., Oberth R. C. Nuclear Power Plants Underground. *ISRM International Symposium*. Stockholm, 1980.
6. Zverev A. B. In-situ research data on stability of chamber structure of underground nuclear power plants. *Soviet Atomic Energy*. 1988. Vol. 64, Iss 4. pp. 150–163.
7. Sarkisov A. A. Opening address of the Chairman of the Conference Program Committee. *Low-power Nuclear Power Plants – a New Line in the Development of Power Systems : Collection of Papers*. Moscow : Akadem-Print, 2015. Vol. 2. pp. 7–9.
8. IAEA-TECDOC-1785. Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident. IAEA, 2016. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1785_web.pdf (accessed: 19.04.2019).
9. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. OECD, 2016. Available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264266865-en> (accessed: 15.12.2018).
10. The development strategy of the Arctic zone of the Russian Federation and national security for the period up to 2020 approved by the Russian President. Available at: <http://static.government.ru/media/files/2Rp5A3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf> (accessed: 15.04.2019).
11. Adamov E. O. Small-scale nuclear power plants in Russia and in the world : Current condition, priorities, engineering prospects. Rosatom. Available at: <http://www.innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf> (accessed: 15.11.2018).
12. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System. 2018 Edition. IAEA, 2018. Available at: https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf (accessed: 20.04.2019).
13. The Methodology of Cost Estimation for Decommissioning Nuclear Facilities in the Russian Federation. International Expert Feedback on the Methodology Developed by ROSATOM : Final Report. OECD, 2018. Available at: <https://oecd-nea.org/globalsearch/download.php?doc=80248> (accessed: 16.04.2019).
14. Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G., Novoziolova N. V. Ecological aspects of underground small-scale nuclear power plant in the Arctic conditions. Yaroslavl : Print-House Yaroslavl, 2018. 170 p.
15. Melnikov N. N., Konukhin V. P., Naumov V. A., Gusak S. A. Reactor units for power supply of remote and inaccessible regions: Selection issue. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 18, No. 2. pp. 198–208.
16. Naumov V. A., Gusak S. A., Naumov A. V. Small nuclear power plants for power supply to the arctic regions: spent nuclear fuel radioactivity assessment. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2018. No. 1. pp. 75–86.
17. Orlov A. O., Smirnov Yu. G. Assessment of design-layout solutions of underground complexes for small nuclear power plants in russian arctic regions. *Izvestiya vuzov. Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 4. pp. 29–34.
18. Korchak A. V. Design methodology for underground structure. Moscow : Nedra communications, 2001. 416 p.