

УДК 658.261:621.039:624

РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ПОДЗЕМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В ПРОЕКТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Е. О. АДАМОВ, научный руководитель, проф., д-р техн. наук, eoa@nikiet.ru
Ю. Н. КУЗНЕЦОВ, главный научный сотрудник, проф., д-р техн. наук

Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, Москва, Россия

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г., следствием которой было разрушение реактора и выброс значительного количества радиоактивных изотопов, привела к росту неприятия объектов атомной энергетики. В ходе расследования среди прочих замечаний были указаны недостаточный уровень инженерно-геологических изысканий, приведший к просчетам при выборе площадок для размещения некоторых атомных станций (АС), нерешенность проблем захоронения отходов и снятия АС с эксплуатации и др. Под влиянием отрицательного общественного отношения к атомной энергетике были прекращены проектно-изыскательские и строительные работы на некоторых площадках, поднимался вопрос о закрытии уже действующих АЭС. Ситуация осложнилась еще и тем, что вопросы развития атомной энергетики стали предметом политической конъюнктуры.

Кроме того, отсутствие у общественности достоверной информации по долгосрочной программе повышения безопасности атомных станций привело к возникновению в стране социально неприемлемого облика ядерной энергетики вообще.

В свою очередь, понимание того, что аварии на атомных станциях, как и на других предприятиях, вполне вероятный факт, определило настоятельную необходимость поиска эффективных решений повышения безопасности АЭС в рамках развития ядерной энергетики как в нашей стране, так и за рубежом.

В стратегии развития атомной энергетики, разрабатываемой академическими, отраслевыми и проектными институтами, предусматривалось создание нового поколения ядерных реакторов с эффективными системами безопасности и локализации аварий, но гарантии полной безопасности нельзя было получить из-за возможных экстремальных ситуаций (землетрясения, смерчи, падения самолетов, диверсии).

Опыт систематических подземных ядерных взрывов в СССР и США показал, что одним из наиболее кардинальных путей повышения безопасности атомной энергетики может стать подземное размещение атомных объектов. По мнению многих специалистов, подземное размещение является одним из наиболее реальных и технически осуществимых путей повышения безопасности, которое, в частности, по мнению академика Андрея Сахарова,

По результатам исследований по подземному размещению атомных станций (АС), проведенных Горным институтом Кольского научного центра РАН и Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники, рассмотрены основные положения концепции создания подземной атомной теплоэлектроцентрали с корпусным кипящим реактором ВК-300 для Красноярского горно-химического комбината.

Ключевые слова: атомная энергетика, стратегия развития, проектирование, атомная станция малой мощности, реакторная установка ВК-300, подземная атомная теплоэлектроцентраль, инженерно-геологические и горнотехнические условия, комплексная безопасность.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.13

должно быть обязательным в условиях потребности человечества в использовании атомной энергии [1–3].

К слову, если первая в мире наземная атомная станция, научное руководство по созданию которой осуществлял академик И. В. Курчатов, была запущена в Обнинске в 1954 г. (впервые электричество от тепла ядерного реактора EBR-I было получено в США, в Национальной лаборатории, штат Айдахо), то о первых подземных атомных станциях можно найти упоминания уже в 1960-е годы в Норвегии (1960), США (1963), Швеции (1964), Франции (1967), Швейцарии (1968). Однако из-за увеличения стоимости и сроков возведения таких объектов и отсутствия горнотехнических методов локализации аварий строительство подземных атомных станций широкого развития не получило. Реально работавшая до 2010 г. подземная атомная ТЭЦ (с промышленным реактором АДЭ-2 тепловой мощностью 1600 МВт) была запущена в составе Горно-химического комбината (СССР) в 1964 г.

Возврат к проблеме подземного размещения атомных станций в 1980–1990-х годах стал возможен благодаря развитию горно-строительной техники и технологий подземного строительства. В этот период времени ключевую роль в отечественных разработках и обосновании концептуальных положений подземного размещения атомных электростанций сыграли Горный институт Кольского научного центра РАН и Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ).

Состояние проблемы строительства подземных АЭС

По заданию Бюро Совета Министров СССР и Президиума АН СССР в Горном институте КНЦ РАН под руководством Н. Н. Мельникова были проведены научные исследования, направленные на повышение безопасности ядерных установок при их подземном

размещении в скальных массивах, обоснование принципов выбора площадок и массивов горных пород для строительства подземных атомных станций, разработку технологий сооружения подземных комплексов и вывода подземных реакторов из эксплуатации.

В конце 1980 – начале 1990-х годов Горным институтом КНЦ (головной по горнотехническому комплексу подземной станции) при сотрудничестве с ведущими профильными организациями страны были выполнены научно-исследовательские работы по обоснованию концепции создания подземных атомных станций в рамках государственной научно-технической программы «Экологически чистая энергетика».

В монографии [4] и трудах международной конференции [5] представлены результаты разработки концепции создания подземных атомных станций, включающей: обоснование площадок для их размещения; выбор скальных массивов, позволяющий обеспечить верхний уровень безопасности в составе подземного энерготехнологического комплекса; технологию строительства подземных комплексов для размещения АС и технико-экономическую оценку их размещения; выработку мер по обеспечению безопасности подземной АЭС при эксплуатации, при диверсионных актах, стихийных бедствиях, воздействиях техногенного характера.

В частности, Горным институтом КНЦ были выполнены расчеты снижения сейсмического воздействия на контур подземных сооружений при размещении подошвы реакторной выработки на глубине 120–150 м. С учетом конкретных горно-геологических условий площадки размещения подземной станции на Кольском полуострове было установлено снижение интенсивности сейсмических колебаний в 1,4–1,7 раза по сравнению с земной поверхностью. Практически во всех исследованиях, проведенных как в нашей стране, так и в США, Канаде, Японии приводятся выводы о снижении интенсивности сейсмических воздействий на сооружения подземной атомной станции по сравнению с наземным расположением.

Концепция использования подземного пространства для размещения объектов атомной энергетики получила развитие в рамках международного сотрудничества по программе Европейской Комиссии TACIS-95, где Горный институт КНЦ по предложению Минатома РФ и президиума Российской академии наук был назначен российским субконтрактором вместе с Восточно-Европейским головным научно-исследовательским и проектным институтом энергетических технологий (ВНИПИЭТ). Выполнен проект повышения безопасности обращения с радиоактивными отходами в северо-западном регионе России. Обоснован выбор потенциальных площадок для пункта захоронения радиоактивных отходов Кольской АЭС, флотов, предприятий и организаций на территории Мурманской и Архангельской областей. С учетом мирового опыта осуществлен анализ строительства могильника, определены компоновочные решения, технико-экономические показатели для подземного и наземного комплексов.

С началом перестройки в условиях перманентной смены правительства, экономической нестабильности, банкротства большинства промышленных предприятий востребованность

исследований по развитию атомной энергетики значительно снизилась, несмотря на то, что академические, отраслевые и проектно-конструкторские институты продолжали вести работы, в которых основное внимание уделялось обеспечению безопасности подземных АЭС с реакторными установками различного типа и мощности [4, 5].

Импульс к дальнейшему развитию атомной энергетики был дан рядом постановлений, утвержденных Президентом РФ. Так, в 2013 г. утверждена «Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [6]. Среди приоритетных задач в данном документе определена необходимость создания альтернативных источников энергии и модернизации энергетической инфраструктуры в арктических регионах, что открывает благоприятные перспективы практического внедрения проектов атомных станций малой мощности (АСММ) для энергоснабжения труднодоступных и удаленных территорий арктических регионов РФ.

Анализ современного состояния российских разработок реакторных установок, проведенный рабочей группой Росатома по отбору предложений для реализации проектов атомных станций малой мощности [7], позволяет сделать вывод, что для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей могут быть созданы АСММ в широком энергетическом диапазоне. В России разработано около 20 технических предложений реакторных установок малой мощности, перспективных для создания АСММ.

Сформировавшийся потенциал реакторных технологий в области создания АСММ базируется на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации энергоустановок атомных подводных лодок и судовых реакторных установок и характеризуется внутренней самозащитенностью для повышения уровня безопасности [7, 8].

В совокупности с барьерами безопасности, предусмотренными проектами АСММ, комплексная безопасность может быть обеспечена при подземном размещении атомных энергоблоков за счет изолирующих свойств вмещающих породных массивов.

Специалисты Горного института КНЦ в продолжение исследований выполняли научное и инженерное обоснование выбора и оценки потенциальных площадок для размещения заглубленных и подземных АСММ в приповерхностных геологических формациях скальных и многолетнемерзлых пород.

В частности, систематизировали данные по программе инженерно-геологических исследований на площадках размещения АСММ, включающей следующие разделы: геодезия и картография; региональная геология и тектоника; сейсмология и сейсмотектоника; инженерная геология и гидрогеология; метеорология и аэрология; обеспечение водными и земельными ресурсами; природно-географическая, социально-производственная и демографическая характеристика района; транспортная сеть; плотность и распределение населения; техногенные условия; экологические аспекты. Рассмотрена задача по оценке теплового воздействия АСММ на вмещающий массив многолетнемерзлых пород в условиях нормальной эксплуатации с учетом фазового перехода «лед – вода» и климатических особенностей регионов потенциального размещения [9–11]. По результатам

исследований разработан алгоритм выбора и оценки площадок для размещения АСММ.

Сегодня во всем мире наблюдается очередной виток возвращения к проблеме развития атомной энергетики на более высоком уровне при создании экологической безопасности ядерного комплекса. Не последнюю роль для подземного размещения ядерных объектов выполняет концепция скоростного строительства в скальном массиве, разработанная Горным институтом КНЦ под руководством академика Н. Н. Мельникова [12]; она предусматривает долговременную устойчивость сооружений, высокую экономическую эффективность строительства и повышенную безопасность горных работ, что затем получило подтверждение на ряде специальных сооружений большого масштаба, в возведении которых институт принимал участие.

В продолжение исследований по освоению Удоканского месторождения меди [13] в настоящее время Горный институт КНЦ выполняет работы по сравнительному анализу различных вариантов энергоснабжения Удоканского ГМК для потенциально возможных проектов АСММ при их подземном размещении со следующими типами реакторных установок: на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем под давлением; на тепловых нейтронах с кипящим теплоносителем; на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями.

Авария на японской АЭС «Фукусима» явилась дополнительным фактором, определяющим требования к защите объектов атомной энергетики от экстремальных внешних воздействий и к системам безопасности, не зависящим от внешних источников энергии, охлаждающей среды и действий персонала станции. В соответствии с этими требованиями в последнее время в мировой атомной энергетике повышенное внимание уделяется разработке реакторных установок с электрической мощностью до 300 МВт, имеющих более эффективную техническую безопасность при аварии с повреждением активной зоны реактора, чем для больших реакторов, и локализации последствий аварий в границах станции при ее подземном размещении.

Примерами зарубежных проектов подземных АСММ являются: модульная реакторная установка малой мощности «mPower» электрической мощностью до 195 МВт, которая разработана компанией Babcock & Wilcox Company (B&W), и интегральный реактор АСР100 электрической мощностью 100 МВт, созданный Национальной ядерной корпорацией Китая (CNNC). В соответствии с проектными решениями указанных установок задачу обеспечения ядерной и радиационной безопасности планируется решать за счет подземного размещения энергоблока, которое предполагает также подземное хранение облученного топлива в течение всего срока службы реакторной установки [14].

Концептуальные подходы к созданию подземных атомных станций, разработанные в предыдущие годы группой организаций при ведущей роли Горного института КНЦ по горнотехническому комплексу [4], получили развитие при разработке проекта подземной атомной теплоэлектроцентрали (АТЭЦ) с реактором ВК-300 на Красноярском горно-химическом комбинате (ГХК) для обеспечения теплом и электроэнергией комбината

и г. Железногорска. Ниже кратко представлены основные проектные решения по созданию этого атомно-энергетического объекта.

Реакторная установка для АТЭЦ Красноярского ГХК

Разработку проекта энергоблока АТЭЦ Красноярского ГХК проводили в соответствии с техническим заданием, утвержденным министром по атомной энергии. Комплексный характер поставленной задачи определил необходимость кооперации ведущих научно-исследовательских, проектных, конструкторских, промышленных и строительных предприятий и организаций атомной промышленности с участием Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники (НИКИЭТ) в качестве головного разработчика реакторной установки.

Исходя из специфических требований к АТЭЦ как источнику тепло- и электроснабжения, в части безопасности при размещении в непосредственной близости от потребителей энергии и конкурентоспособности по отношению к конденсационным АЭС и ТЭЦ на органическом топливе, по заказу отрасли НИКИЭТ были разработаны материалы технического проекта реакторной установки ВК-300 [15, 16] (рис. 1).

Корпусной кипящий реактор ВК-300 характеризуется следующими основными параметрами: высота 10,8 м; диаметр (наружный, максимальный) 4,5 м; масса 330 т; тепловая мощность 750 МВт; циркуляция теплоносителя естественная; давление теплоносителя 7 МПа, температура 285 °С.

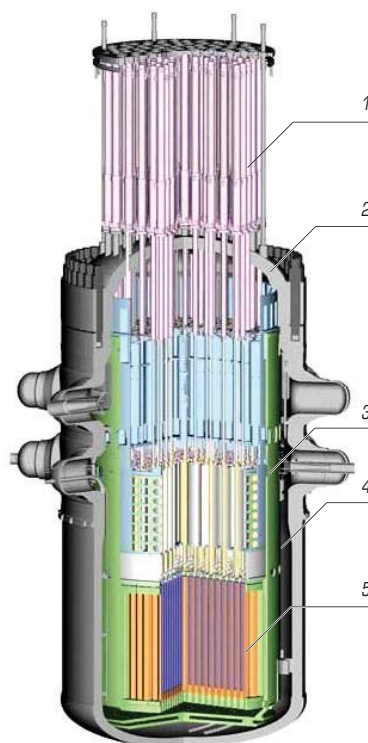


Рис. 1. Реактор ВК-300 [17, 18]:

1 – приводы исполнительных механизмов системы управления и защиты реактора; 2 – крышка корпуса; 3 – шахта реактора; 4 – корпус реактора; 5 – активная зона

Следует отметить, что разработкам реакторов этого типа, относящихся к пассивным реакторам нового поколения, уделяется значительное внимание в мировой практике. В нашей стране имеется длительный (более 30 лет) успешный опыт эксплуатации атомной станции с корпусным кипящим реактором ВК-50 в Димитровграде. С позиции обеспечения безопасности наиболее важными особенностями корпусных кипящих реакторов являются:

- физические характеристики реактора, позволяющие реализовать принцип внутренне присущей безопасности, в основном за счет отрицательных обратных связей между реактивностью реактора и его мощностью, температурой топлива и паросодержанием;
- одноконтурная схема и естественная циркуляция теплоносителя в реакторе при всех режимах эксплуатации без главных циркуляционных насосов и парогенераторов.

Возможность надежной работы атомной станции с кипящим корпусным реактором в переменном режиме при изменении электрической нагрузки, что важно для автономных энергосистем, подтверждена серией специальных экспериментов на реакторе ВК-50. Результаты экспериментов показали, что такой реактор успешно справляется с резкими изменениями нагрузки, которые могут достигать 25 % номинальной мощности.

При разработке проекта реакторной установки ВК-300 для получения требуемых экономических показателей и параметров безопасности энергоблоков АТЭЦ был использован реализуемый в технологии кипящих реакторов подход предельного упрощения конструкции и схемы установки, систем энергоблока и обеспечения пассивного принципа работы реактора и всех систем безопасности [13, 15].

В частности, в проекте ВК-300 применены следующие решения [15]:

- интегральная компоновка при одноконтурной схеме;
- построение системы аварийного охлаждения активной зоны, обеспечивающее при разрыве магистралей локализацию и возврат теплоносителя в реактор простыми пассивными средствами без использования внешних источников воды и электропитания;
- первичная защитная оболочка реактора, позволяющая реализовать указанный принцип построения системы аварийного охлаждения активной зоны;
- единая вторичная защитная оболочка, в которой размещаются реактор в первичной защитной оболочке и турбина.

Установленная электрическая мощность энергоблока ВК-300 с расчетным сроком службы 60 лет составляет 250 МВт в конденсационном режиме и 180 МВт в теплофикационном режиме при тепловой нагрузке 400 Гкал/ч.

На основе материалов технического проекта ВК-300 было разработано технико-экономическое обоснование АТЭЦ Красноярского ГХК и Основные положения типового проекта АТЭЦ с ВК-300 для региональной энергетики.

Повышение безопасности атомных станций — ключевая задача в решении проблемы развития атомной отрасли в целом. Вместе с тем фактор безопасности таких объектов приобретает особое значение в контексте эффективного использования

АСММ при их размещении вблизи потребителей энергетической продукции, особенно в труднодоступных районах. С этой позиции реакторные установки малой мощности обладают потенциалом для существенного повышения безопасности по сравнению с большой атомной энергетикой. Современные разработки проектов АСММ, направленные на снижение требований к защитным мерам за пределами площадки и уменьшение радиуса защитной зоны вокруг станции, базируются на конструктивных и инженерно-технических решениях, среди которых выделяются следующие [8, 18, 19]:

- снижение последствий потенциальных выбросов вследствие меньшей топливной загрузки активных зон реакторов, меньшей запасенной неядерной энергии и меньшей суммарной мощности остаточного энерговыделения;
- применение преимущественно многократно резервированных пассивных систем безопасности;
- модульно-блочная структура реакторных установок, основанная на интегральной компоновке первого контура.

Комплексная безопасность, включая локализацию последствий внутренних внештатных ситуаций, решение задачи физической защиты и защиты от внешних воздействий техногенного и природного характера, может быть гарантированно обеспечена при подземном размещении реакторных установок [20].

Инженерно-геологические и горнотехнические условия площадки для размещения подземной АТЭЦ

В геологическом отношении этот район располагается вблизи зоны сочленения древней Восточно-Сибирской платформы с молодой Западно-Сибирской плитой и Алтае-Саянским складчатым регионом в пределах так называемой Саяно-Енисейской метаплатформенной области. Она сложена весьма разнообразным комплексом осадочных, метаморфических и магматических пород возрастом от архея до кайнозоя включительно. Тектоника района характеризуется опусканием Западно-Сибирской плиты и поднятием Сибирской платформы при взаимном смещении до 10 мм и более в год [21].

Породный массив, сложенный биотитовыми гнейсами с наличием жильных включений диабазов порфиритов, в

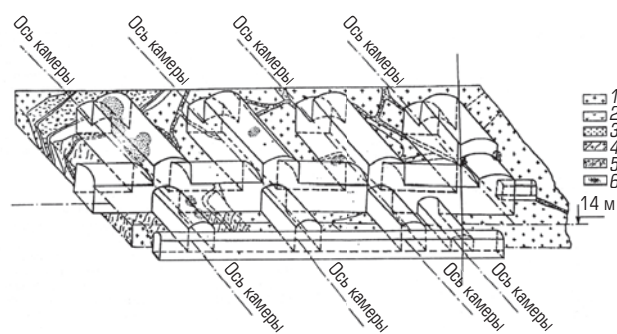


Рис. 2. Породный массив, пересекаемый горными выработками Красноярского ГХК:

1 — гнейсы биотитовые; 2 — диабазы; 3 — порфириты; 4 — зоны расслоения; 5 — зоны дробления; 6 — места крупных вывалов

инженерно-геологическом отношении достаточно изучен, соответствует требованиям для размещения подземной АТЭЦ и благоприятен для строительных конструкций (рис. 2).

В соответствии с требованиями «Норм проектирования сейсмостойких атомных станций» [22], АС должна обеспечивать безопасность при сейсмических воздействиях до максимального расчетного землетрясения (МРЗ) включительно и выработку (выдачу) энергетической продукции, вплоть до проектного землетрясения (ПЗ) включительно. Сейсмичность площадки размещения подземной АТЭЦ характеризуется следующими параметрами сейсмических воздействий по шкале MSK-64: ПЗ – 5 баллов, МРЗ – 6 баллов. Микросейсмораионирование на территории не производили, площадка подлежит изучению и районированию с целью определения параметров непосредственно на месте предполагаемого строительства.

Оценка сейсмической опасности АТЭЦ показывает, что воздействия в «дальней зоне» (около 100 км) могут составить 6–7 баллов на грунтах II категории. В качестве расчетного землетрясения «ближней зоны» принято гипотетическое землетрясение с $M_{\text{макс}} = 4,5$ непосредственно под площадкой ГХК на глубине 10 км (наихудший вариант). По оценкам, в случае возникновения такого события интенсивность на грунтах II категории по сейсмическим свойствам не превысит 6,5 баллов.

Результаты исследований в целом свидетельствуют о том, что рассматриваемый скальный массив располагается в поле естественных напряжений, близком к равнокомпонентному. При прочих равных условиях такое сочетание напряжений является благоприятным с позиции устойчивости подземных выработок. В окрестности имеющихся выработок сформирована зона техногенной разгрузки, которая отличается пониженным уровнем напряжений и сниженными упругопрочностными свойствами. Мощность зоны техногенной разгрузки не превышает 4–5 м для отдельной камеры, а для группы камер – около 14 м. Указанное обстоятельство является благоприятным фактором, снижающим нежелательную концентрацию напряжений на контуре выработки.

Установлено, что породный массив на площадке обладает высокими изоляционными свойствами, предотвращающими возможность радиационного загрязнения природной среды как при нормальной эксплуатации АТЭЦ, так и при внутренних инцидентах.

Основные проектные решения подземной АТЭЦ Красноярского ГХК

В основу проектирования подземного комплекса АТЭЦ с реактором ВК-300 на Красноярском ГХК легли концептуальные

положения по созданию подземных атомных станций, которые, как отмечалось ранее, были разработаны группой организаций при ведущей роли Горного института КНЦ РАН. Основными исполнителями проекта явились: Восточно-Европейский головной научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ); Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники; Красноярский ГХК; Всероссийский проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии (ВНИПИПромтехнологии); Красноярский филиал ВНИПИЭТ.

АТЭЦ состоит из двух автономных энергоблоков электрической мощностью 250 МВт каждый. При эксплуатации в теплофикационном режиме возможный отпуск энергетической продукции составляет 3000 млн кВт·ч/год электроэнергии и 3800 тыс. Гкал/год тепла.

Подземный комплекс АТЭЦ располагается в двух существующих горных выработках, скомпонованных по функциональному признаку и соединенных между собой транспортными и коммуникационными тоннелями.

Системы безопасности в каждом энергоблоке размещаются таким образом, чтобы при любом исходном событии не могло выйти из строя более одного канала безопасности. Кроме того, с целью исключения перекреста управляющих и энергетических коммуникаций каналы разных систем группируются в энергоблоке в зависимости от их принадлежности к управляющим системам.

Все оборудование по передаче тепловой энергии от станции к потребителям размещается в свободных горных выработках, а для прокладки трубопроводов теплоснабжения используют существующие тоннели. Транспортный тоннель расположен на абсолютной отметке –154 м.

Размещение энергоблоков АТЭЦ в существующих выработках требует углубления подземных сооружений в зоне реакторов и турбин. При этом оцениваемый строительный объем выбранного грунта составляет 62280 м³, в том числе для I очереди – 39412 м³, для II очереди – 22868 м³.

Заключение

Проектные материалы подземной атомной теплоэлектроцентрали с реакторной установкой ВК-300 свидетельствуют, что на современном уровне реакторостроения и технологий подземного строительства подземное размещение атомных станций позволяет технически и экономически эффективно обеспечить повышение их безопасности, надежную защиту от экстремальных внешних воздействий, экологичность, безопасный вывод из эксплуатации.

Библиографический список

1. Duffaut P. Safe Nuclear Power Plants Shall Be Built Underground // Underground Space: Expanding the Frontiers : proceedings of the 11th ACUUS International Conference. – Athens, 2007. P. 207–212.
2. Breeze P. Nuclear Power. – Amsterdam : Academic Press, 2017. – 106 p.
3. Alam F, Sarkar R., Chowdhury H. Nuclear power plants in emerging economies and human resource development: A review // Energy Procedia. 2019. Vol. 160. P. 3–10.
4. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. Подземные атомные станции. – Аптиты : КНЦ АН СССР, 1991. – 138 с.
5. Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики : матер. междунар. конф. / под ред. Н. Н. Мельникова. – Аптиты : КНЦ РАН, 1995. Ч. 1. – 86 с.; Ч. 2. – 274 с.
6. 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/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf (дата обращения: 15.01.2019).
7. 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: 06.10.2018).
 8. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. А. А. Саркисова. – М.: Академ-Принт, 2015. Т. 2. – 387 с.
 9. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Гусак С. А., Новожилова Н. В., Климин С. Г. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1(13). С. 30–37.
 10. 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.
 11. Мельников Н. Н., Гусак С. А., Амосов П. В., Наумов В. А., Наумов А. 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.
 12. Скоростное строительство подземных комплексов в скальных массивах / под ред. Н. Н. Мельникова. – Апатиты: КНЦ РАН, 1992. – 142 с.
 13. Проблемы разработки Удоканского месторождения меди / под ред. Н. Н. Мельникова. – Апатиты: КНЦ АН СССР, 1990. – 190 с.
 14. 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: 20.11.2018).
 15. Впереди века. Ордена Ленина Научно-исследовательскому и конструкторскому институту энерготехники имени Н. А. Доллежалы (НИИ-8 – НИКИЭТ) 60 лет. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – 464 с.
 16. Вопросы регионального (локального) атомного энергоснабжения. 2018. URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/XI_reg_forum_2018/08_Pimenov_Voprosy_regionalnogo_atomnogo.pdf (дата обращения: 20.01.2019).
 17. Ачкасов А. Н., Гольцев Е. В., Гречко Г. И., Кузнецов Ю. Н. Реакторные установки для атомных станций малой мощности // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 1. С. 43–48.
 18. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System / IAEA, 2014. URL: https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf (дата обращения: 25.11.2017).
 19. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. А. А. Саркисова. – М.: Наука, 2011. Т. 1. – 376 с.
 20. Мельников Н. Н., Гусак С. А., Наумов В. А. Использование атомных станций малой мощности для энергоснабжения арктических месторождений твердых полезных ископаемых // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. № 1. С. 66–77.
 21. Зверев А. Б., Гусakov П. Г., Волжанин Ю. С., Лебедев В. А., Морозов П. В. и др. О строительстве и эксплуатации сооружений первой отечественной подземной атомной станции // Горный журнал. 1995. № 9. С. 40–43.
 22. НП-031–01. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М., 2001. – 49 с. [7]

«GORNVI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 90–95
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.13

Implementation of concept on underground arrangement of small-scale nuclear plants in project engineering

Information about authors

E. O. Adamov¹, Research Manager, Professor, Doctor of Engineering Sciences, eoa@nikiet.ru

Yu. N. Kuznetsov¹, Chief Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences

¹ Dollezhal Scientific Research and Design Institute of Energy Technologies, Moscow, Russia

Abstract

It has been commonly recognized this day that the further development of the national power engineering will be based on the atomic energetic given improved ecological safety, external immunity and competitive advantage over other sources of energy. During operation of atomic power stations both in Russia and abroad, a series of sever accidents took place with considerable radioactivity discharge, which stimulated research towards development of enhanced safety reactors based on internal autoprotection principles.

This article presents basic postulates of the concept developed with the major contribution from the Institute of Mining, Kola Science Center of the RAS and the Scientific Research and Design Institute of Energy Technologies. The concept consists in enhancement of integrated safety as per small-scale nuclear power plant projects by means of underground arrangement of nuclear power-generating units using isolating properties of enclosing rock mass.

The concept of integrated safety of underground reactor facility arrangement, including localization of internal hazard after-effects, physical protection as well as protection from the external natural or man-made disturbance has been implemented in the underground nuclear power plant project engineering for the Krasnoyarsk Integrated Mining and Chemical Works. The key points of the project are given in this article.

Keywords: atomic energetics, development strategy, project engineering, small-scale nuclear power-generating plant, reactor plant VK-300, underground nuclear cogeneration plant, geological and geotechnical conditions, integrated safety.

References

1. Duffaut P. Safe Nuclear Power Plants Shall Be Built Underground. *Underground Space: Expanding the Frontiers: proceedings of the 11th ACUUS International Conference*. Athens, 2007. pp. 207–212.
2. Breeze P. Nuclear Power. Amsterdam: Academic Press, 2017. 106 p.
3. Alam F., Sarkar R., Chowdhury H. Nuclear power plants in emerging economies and human resource development: A review. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 160. pp. 3–10.
4. Melnikov N. N., Konukhin V. P., Naumov V. A. Underground nuclear power stations. Apatity: KNTs AN SSSR, 1991. 138 p.
5. 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. 86 p.; Iss. 2. 274 p.

6. 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/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf> (accessed: 15.01.2019).
7. 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: 06.10.2018).
8. Sarkisov A. A. (Ed.). Small-scale nuclear power plants: New trend in power engineering. Moscow: Akadem-Print, 2015. Vol. 2. 387 p.
9. Melnikov N. N., Amosov P. V., Gusak S. A., Novozhilova N. V., Klimin S. G. 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.
10. Melnikov N. N., Amosov P. V., Klimin S. G., Novozhilova N. V. Ecological aspects of underground small-scale nuclear power plant in the Arctic conditions. Yaroslavl: Print-House Yaroslavl, 2018. 170 p.
11. Melnikov N. N., Gusak S. A., Amosov P. V., Naumov V. A., Naumov A. V. et al. Verification studies on a methodology for constructing underground complexes to dispose small nuclear power plants in the Arctic conditions. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2018. No. 3(31) pp. 123–136.
12. Melnikov N. N. (Ed.). Rapid construction of underground complexes in hard rock mass. Apatity: KNTs RAN, 1992. 142 p.
13. Melnikov N. N. (Ed.). The Udokan copper deposit development problems. Apatity: KNTs AN SSSR, 1990. 190 p.
14. 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: 20.11.2018).
15. Ahead of the century. Dollezhal Research and Design Institute of Energy Technology (NIИ-8–НИКИЭТ) is 60. Moscow: NIKIET, 2012. 464 p.
16. Regional (local) nuclear power supply issues. 2018. Available at: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/XI_reg_forum_2018/08_Pimenov_Voprosy_regionalnogo_atomnogo.pdf (accessed: 20.01.2019).
17. Achkasov A. N., Goltsov E. V., Grechko G. I., Kuznetsov Yu. N. Reactor facilities for small nuclear power plants. *Atomic Energy*. 2012. Vol. 113, No. 1. pp. 43–48.
18. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System. IAEA, 2014. Available at: https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf (accessed: 25.11.2017).
19. Sarkisov A. A. (Ed.). Small-scale nuclear power plants: New trend in power engineering. Moscow: Akadem-Press, 2011. Vol. 1. 376 p.
20. Melnikov N. N., Gusak S. A., Naumov V. A. Use of small nuclear power plants for power supply of the arctic solid mineral deposits. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2017. No. 1. pp. 66–77.
21. Zverev A. B., Guskov P. G., Volzhanin Yu. S., Lebedev V. A., Morozov P. V. et al. Building and operation of the first domestic underground nuclear power-generating plant structures. *Gornyi Zhurnal*. 1995. No. 9. pp. 40–43.
22. Design Standards NP-031–01. Federal standards and regulations in nuclear energy use. Design standards for antiseismic nuclear power plants. Moscow, 2001. 49 p.