

УДК 621.039.577:624.1(985)

Ю. Г. Смирнов, А. О. Орлов

Анализ мирового опыта строительства подземных атомных станций и оценка возможности его использования для арктических регионов России

Yu. G. Smirnov, A. O. Orlov

Analysis of world experience in constructing underground small nuclear power plants and assessment of its potential use in the Russian Arctic regions

Аннотация. Рассмотрены общая идеология и основная идея размещения атомных станций под землей. Приведен анализ конкретных примеров отечественного и зарубежного опыта их проектирования. Показано, что подземные атомные станции могут быть альтернативным источником электрической и тепловой энергии при решении оборонно-стратегических и социально-экономических задач, особенно при освоении арктических регионов России.

Abstract. The paper considers the common ideology and main idea of locating underground nuclear plants. Specific examples in domestic and foreign experience have been analyzed. It has been established that underground small nuclear power plants can be used as an alternative source of electric and thermal energy for solving defense-strategic and social-economic tasks particularly when developing mineral raw material resources in the Russian Arctic regions.

Ключевые слова: геологическая формация, подземное размещение, атомные станции малой мощности, геоэкологическая безопасность, Российская Арктика.

Key words: geological formation, underground location, small nuclear power plants, geo-ecologic safety, Russian Arctic.

Введение

Исследованиями, выполненными в Горном институте КНЦ РАН, установлено, что подземное размещение атомных станций является одним из наиболее перспективных способов повышения безопасности ядерной энергетики, хотя многие аспекты этого решения требуют проведения дальнейших углубленных теоретических и экспериментальных работ. Реализация проектов подземных энергетических объектов реально осуществима на современном уровне развития техники и технологий как в области шахтного строительства, так и по реакторным установкам [1].

Концепция использования геологической формации как основного барьера надежной подземной изоляции, в частности для пунктов хранения радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), является общепринятой [2]. Надежность сооружений в геологических формациях определяется тремя связанными между собой характеристиками среды: возможными каналами миграции радионуклидов, встречающимися потоками подземных вод и газов и имеющимися естественными и техногенными тепловыми потоками.

Гарантией геоэкологической безопасности подземных атомных станций (ПАЭС) на период ее строительства и эксплуатации является устойчивость геологической среды, определяемая разномасштабными факторами, основными из которых являются:

- геодинамическая стабильность массива горных пород;
- стабильность гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод;
- неизменность физико-механических свойств горных пород и их устойчивость к внешним воздействиям (вибрация, фильтрация вод и т. д.).

Каждое из перечисленных условий требует детального анализа геологических и инженерно-геологических данных на стадии технико-экономического обоснования и проектирования с последующим активным мониторингом геологической среды на весь период эксплуатации станции [3].

Роль арктических регионов в экономике России

Роль Арктической зоны Российской Федерации в экономике России неопределима. Производимая здесь продукция обеспечивает получение около 11 % национального дохода России при доле населения 1 % и составляет примерно 22 % объема общероссийского экспорта. В Арктике сосредоточены практически все виды минерального сырья. В Арктических регионах добывается 100 % алмазов, сурьмы, апатитов, флогопита, вермикулита, редких и редкоземельных металлов, 98 % платиноидов, 95 % газа, 90 % никеля

и кобальта, 60 % меди. Общая оценочная стоимость минерального сырья в недрах превышает 30 трлн долларов, причем две трети этой суммы приходится на долю энергоносителей.

В Арктике сосредоточены основные ресурсы углеводородов всего континентального шельфа Российской Федерации. В арктических районах сконцентрирована добыча важнейших полезных ископаемых: апатит-нефелиновых руд, многих стратегически важных цветных и драгоценных металлов (тантал, ниобий, никель, медь, кобальт и другие). Арктический шельф России может стать уже в текущем веке основным источником углеводородного сырья как для самой России, так и для мирового рынка, учитывая истощение запасов природных ресурсов в освоенных материковых районах.

Дальнейшее развитие Арктической зоны России также связано с возрождением навигации по Северному морскому пути, который законодательством РФ определен как "исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация России в Арктике". Перспективы использования кратчайшего транспортного коридора общей длиной около 5 600 км между портами Западной Европы и портами Юго-Восточной Азии и Северной Америки в связи ростом экономической активности в Арктике и изменением климатических условий возрастают. Важное стратегическое значение Северного морского пути также связано с возможностью транспортировки из Арктических регионов углеводородного и минерального сырья, а также снабжения этих районов техникой и продовольствием.

Холодные моря Арктики являются важнейшими для страны районами промыслового рыболовства и добычи других морепродуктов. Арктический регион обладает значительными биологическими морскими и наземными ресурсами. Рыбохозяйственный комплекс обеспечивает до 15 % вылова водных биоресурсов и производимой в Российской Федерации рыбной продукции.

При ведении хозяйственной деятельности в Арктике необходимо учитывать следующие специфические условия, отличающие эти регионы от других районов страны:

- экстремальные для проживания человека природно-климатические условия, которые оказывают негативное воздействие на здоровье людей;
- низкая плотность населения и ограниченный характер хозяйственного освоения территорий;
- удаленность от основных промышленных центров;
- высокая степень трудоемкости и себестоимости работ;
- специфические формы хозяйствования (широкое использование вахтового способа);
- зависимость жизнеобеспечения населения от поставок продовольствия, материально-технических ресурсов, топлива по сложным транспортным схемам в ограниченные сроки навигации.

Концептуальные аспекты создания подземных станций малой мощности

Общая идеология размещения АЭС в подземных условиях основывается на известных преимуществах:

- эффективная защита от внешних воздействий (падение самолета, использование ракетного вооружения);
- исключение выбросов при проектных и запроектных авариях реактора;
- решение проблемы сбора и хранения радиоактивных отходов;
- упрощение и удешевление вывода из эксплуатации;
- высокая степень пожарной безопасности за счет регулирования состава и количества воздуха в герметичных помещениях;
- возможность размещения в непосредственной близости от населенных пунктов или промышленного объекта, чем достигается эффективность использования тепловой и электрической энергии.

Сооружение ПАЭС возможно практически в любых инженерно-геологических условиях независимо от свойств породного массива. При этом необходима четкая система представлений о геологическом риске строительства атомных станций, без которой создание даже сверхнадежных реакторов не гарантирует полной безопасности [4].

При выборе места размещения станции оцениваются наиболее благоприятные сейсмические, структурно-тектонические, геоморфологические, гидрогеологические и другие свойства вмещающего породного массива. При этом наиболее важное значение имеют показатели сейсмичности района и тектонической нарушенности геологической формации. Эти параметры определяются на основе предварительного сейсмического районирования и структурно-тектонической оценки, включающей анализ современных подвижек земной коры [5].

К подземному размещению АЭС предъявляют следующие важнейшие требования при проектировании, строительстве и эксплуатации:

- вмещающий породный массив должен быть в полной мере использован в качестве основного защитного барьера;
- геологическая формация должна характеризоваться единством геологической структуры, малой гидро- и газопроницаемостью, хорошей сорбционной способностью по отношению к радионуклидам и неизменяемостью естественных свойств в течение всего периода эксплуатации атомной станции;

– конструктивные элементы подземных сооружений, включая крепи (обделки), должны обладать повышенной устойчивостью и прочностью при возможных внешних и внутренних воздействиях, возникающих как при эксплуатации, так и в аварийных случаях.

Объекты малой ядерной энергетики, к которым относятся атомные станции малой мощности (АСММ), способны обеспечить реализацию следующих основных задач:

– поддержание жизнеспособности и обеспечение экономического развития удаленных или депрессивных регионов;

– сохранение и дальнейшее развитие потенциала хозяйственной деятельности на этих территориях.

Концептуальные аспекты создания подземных АСММ включают следующие основные положения:

– глубина заложения выработки для размещения реактора определяется, исходя из исключения проникновения в биосферу радионуклидов при запроектной аварии (взрыве) на реакторе даже при повреждении крепи и нарушении сплошности породного массива;

– крепь (обделка) выработки должна быть рассчитана на внешнее давление окружающих горных пород, нагрузку и температуру от гипотетической аварии;

– место расположения реактора может быть совмещено с временным хранением низко- и среднеактивных отходов;

– конструктивно-компоновочные решения подземных АСММ должны включать возможность извлечения и вывоза реакторов для ремонтных работ на заводах-изготовителях;

– снятие реакторов с эксплуатации производят в подземных условиях с учетом возможности повторного использования реакторного отделения для следующего поколения реакторов;

– окончательная консервация станции при невозможности ее дальнейшей эксплуатации производится путем заполнения образовавшихся после демонтажа оборудования пустот инертными материалами и возведением бетонной перемычки;

– при строительстве станции допускается поэтапный ввод блоков в эксплуатацию с промежутками в годы или даже десятки лет;

– дальнейшее развитие модульной малой подземной энергетики основывается на использовании судовых реакторов малой мощности 2–10 МВт, обладающих небольшими размерами и повышенной надежностью.

Отечественный и зарубежный опыт проектирования и эксплуатации ПАЭС

Первой подземной АЭС СССР–России являются ядерные реакторы Красноярского ГХК (г. Железногорск). Конечно, это не АЭС "в чистом виде": все-таки основной задачей водографитовых канальных реакторов была наработка оружейного плутония. Они создавались с возможностью попутной выработки тепловой и электрической энергии.

В 1958 г. заработал первый реактор АД, следом – АДЭ-1, которые использовались для получения оружейного плутония. В 1964 г. введен в эксплуатацию уже ориентированный на энергетику АДЭ-2 (электроснабжение, отопление, горячее водоснабжение комбината и г. Железногорска с населением более 100 тыс. человек) является единственной в России подземной атомной станцией. Размещаются реакторы в подземных выработках на глубине более 200 м от земной поверхности.

Подземная АЭС входит в общий технологический комплекс Красноярского горно-химического комбината [6]. 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. Тектоника района неблагоприятна и характеризуется опусканием Западно-Сибирской плиты и поднятием Сибирской платформы при взаимном смещении до 10 м и более в год.

Разработанные в России принципы подземного размещения АЭС и проекты позволяют в условиях повышения безопасности ядерных установок увеличить производство электрической и тепловой энергии. Специалистами ОАО "ВНИПИ энергетических технологий", Научно-исследовательского и конструкторского института энергетических технологий ("ОАО НИКИЭТ"), ОАО "ВНИПИ протехнологии", ЦНИИ им. А. Н. Крылова, ОКБМ им. Африкантова, Горного института КНЦ РАН и других организаций накоплен значительный опыт проектирования ПАЭС различных типов и классов.

В проект ОАО "ВНИПИ протехнологии" необслуживаемой саморегулируемой атомной термоэлектрической станции малой мощности (НС ПАТЭС "Елена"), приведенный на рис. 1, заложены следующие конструктивные решения [7]:

– отсутствие водоемов – охладителей;

– наличие трех прочных корпусов – трех барьеров, препятствующих распространению РАО при любой аварии.

Способ размещения станции может быть котлованным (заглубленным), в вертикальном шахтном стволе, в штольне или в другой горизонтальной горной выработке, в том числе в выработках отработавших

рудников, сохранивших устойчивое состояние. Для НС ПАТЭС принят реактор с ядерным генератором тепловой и электрической энергии.

В рассматриваемом проекте заложен новый концептуальный подход с максимальным использованием принципов самозащитности. Основные особенности такого подхода: необслуживаемость (работа без участия человека); саморегулируемость; изолируемость от окружающей среды (нет системы вентиляции и сброса жидких и твердых РАО в течение всего срока службы, в том числе и в аварийных ситуациях).

Теплоэлектростанции особенно необходимы в отдаленных труднодоступных небольших поселках нефтяников, геологов, старателей, рыболовов и охотников в районах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, а также в местах расположения Арктической группировки российских Вооруженных сил. Таким образом, предлагаемый проект можно рассматривать как первую попытку использования автономных источников энергообеспечения арктических районов страны.

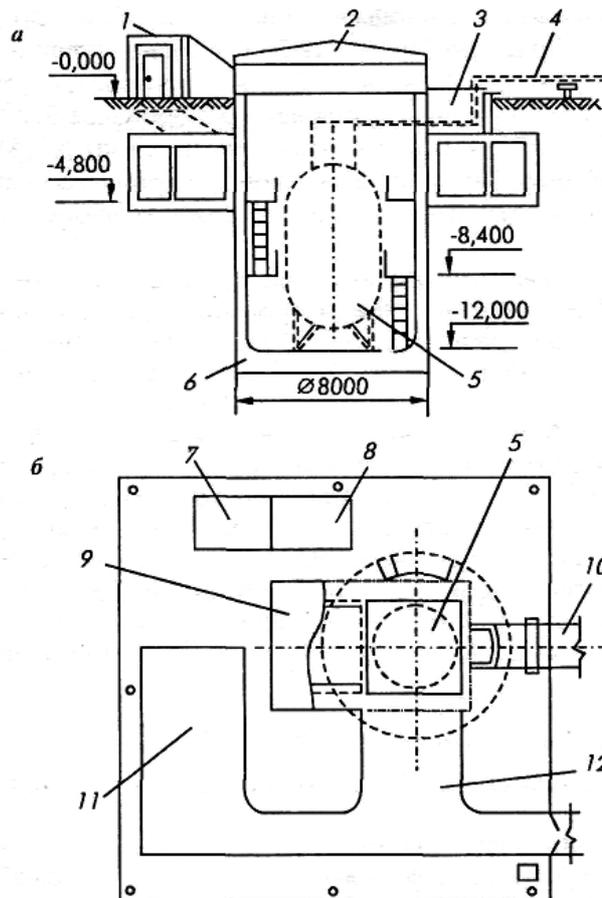


Рис. 1. Необслуживаемая саморегулируемая атомная термоэлектрическая станция шахтного типа особо малой мощности НС ПАТЭС "Елена": а – разрез шахты с установкой энергоблока;

б – схема генерального плана; 1 – вход на станцию; 2 – защитная крышка;

3 – приямок вывода наружных сетей; 4 – наружные сети; 5 – энергоблок; 6 – железобетонная обделка со стальной оболочкой; 7 – склад; 8 – бытовое помещение; 9 – укрытие; 10 – наружные сети;

11 – стойка автотранспорта; 12 – монтажная площадка

Зарубежный опыт создания ПАЭС насчитывает более 50 лет и показывает, что подземная компоновка ядерных реакторов обеспечивает гораздо более высокую степень защиты окружающей среды и населения, чем у аналогичных наземных АЭС. Первая экспериментальная подземная АЭС "Халден" с тяжеловодным кипящим реактором была введена в эксплуатацию в 1960 году в Норвегии. Ее мощность составила 25 МВт. Подземная выработка, в которой размещен реактор, расположена в скальном массиве на глубине 30 м и имеет геометрические размеры: длина 30 м, ширина 10 м и высота 26 м. АЭС "Халден" была построена в непосредственной близости от населенного пункта.

В настоящее время в мире (кроме России) построено и эксплуатируется шесть подземных атомных станций. Это, кроме упомянутой "Халден", "Гумбольдт" (1968 г., США), "Агеста" (1964 г., Швеция), "Люцерн" (1968 г. Швейцария), "Сена-Чуз" и "Тулуза-2" (1967 и 2005 гг., Франция). Еще одна экспериментальная АЭС SA (Швейцария) была построена в 1968 году, однако после аварии реактора в 1969 году была остановлена [8].

Подземная АЭС "Сена-Чуз" мощностью 275 МВт с реактором PWR эксплуатируется до настоящего времени (рис. 2). Особенностью ее компоновки является то, что реактор, его вспомогательные системы и системы локализации аварии установлены в двух подземных сооружениях, закрепленных монолитным бетоном, а турбогенераторы, системы управления и вспомогательное оборудование размещены в здании на поверхности. Стены реакторного помещения дополнительно покрыты стальными листами. Подземные выработки размещены в сланцевых породах на глубине 50 м.

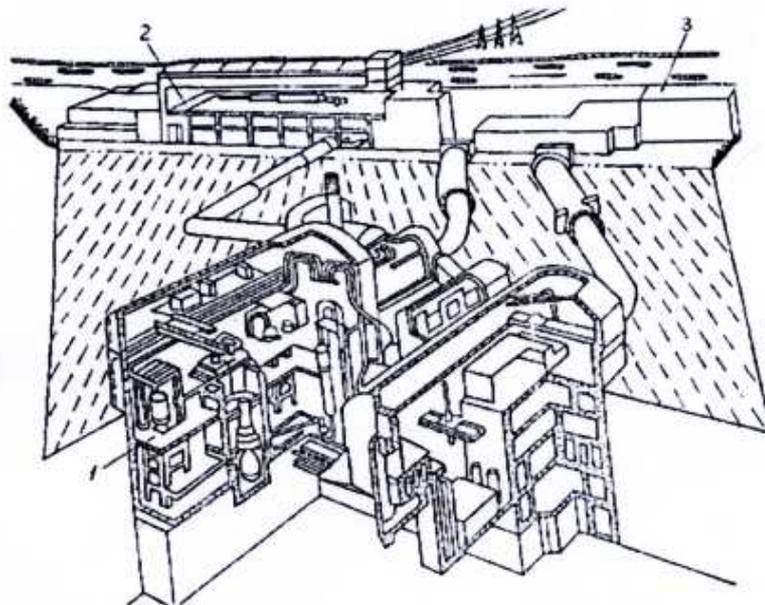


Рис. 2. Подземная АЭС "Сена-Чуз": 1 – выработки реакторного помещения; 2 – выработки электротехнического оборудования; 3 – помещения вспомогательных систем

Анализ опыта эксплуатации ПАЭС за рубежом подтвердил высокую степень защищенности обслуживающего персонала и населения при подземном размещении энергетических объектов и их высокую экологическую безопасность. При выборе конструктивно-компоновочных решений важно принимать во внимание, чтобы в непосредственной близости от реактора находился бассейн выдержки, пункт перегрузки топлива и хранилище отработавшего ядерного топлива. При эксплуатации станции все работы с радиационно опасными материалами ведутся только в подземных сооружениях. Однако высокая стоимость электроэнергии, вырабатываемой на первых подземных АЭС в мире, привела к их остановке.

Заключение

Подземное размещение атомных станций в условиях Арктического региона России является одним из перспективных направлений повышения безопасности ядерной энергетики и может служить альтернативным источником энергообеспечения, особенно в зонах со сложными климатическими и транспортными условиями.

Основная идея сооружения АСММ заключается в создании безопасных подземных комплексов, способных противостоять любому негативному воздействию. При этом окружающий породный массив используется как основной защитный барьер, а подземное строительство допустимо практически в любых горно-геологических условиях.

Автономные подземные станции при высокой степени надежности могут использоваться в качестве безопасных источников электрической и тепловой энергии для решения оборонно-стратегических и социально-экономических задач при освоении Арктических регионов России.

Библиографический список

1. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А. Подземные атомные станции. Апатиты : Изд-во КНЦ АН СССР, 1991. 138 с.
2. Кокосадзе А. Э., Чесноков С. А., Фридкин В. М. Особенности инженерных сооружений подземной энергетики // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2013. Вып. 3. С. 56–72.
3. Богданов Ю. В., Тимченко В. С. Техничко-экономические проблемы и перспективы создания подземных атомных станций средней и малой мощности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. Т. 3 (178). С. 71–81.
4. Подземные атомные станции: альтернатива отказу от атомной энергетики / Е. Н. Камнев, Е. А. Котенко, В. Ф. Дороднов, А. Б. Зверев // Горный журнал. 2011. № 8. С. 4–8.

5. Котенко Е. А. Создание подземных атомных станций. М : ЦНИИАтоминформ, 1996. 95 с.
6. Котенко Е. А. Ядерные энергокомплексы подземного пространства // Горный журнал. 1995. № 9. С. 34–40.
7. Кокосадзе А. Э. Конструктивно-технологические решения объектов подземной атомной энергетики малой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М. : Горная книга. 2010. С. 337–341.
8. Муратов О. Э. Подземные АЭС: эффективность и безопасность // Вопросы атомной науки и техники. 2002. № 6. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (82). С. 19–29.

References

1. Melnikov N. N., Konuhin V. P., Naumov V. A. Podzemnye atomnye stantsii [Underground nuclear power plants]. Apatity : Izd-vo KNTs AN SSSR, 1991. 138 p.
2. Kokosadze A. E., Chesnokov S. A., Fridkin V. M. Osobennosti inzhenernykh sooruzheniy podzemnoy energetiki [Particularities in underground engineering energy constructions] // Izvestiya TulGU. Nauki o zemle. 2013. Вып. 3. P. 56–72.
3. Bogdanov Yu. V., Timchenko V. S. Tehniko-ekonomicheskie problemy i perspektivy sozdaniya podzemnykh atomnykh stantsiy sredney i maloy moschnosti [Technical-economic problems and prospective in creating small and medium underground nuclear power plants] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. 2013. V. 3 (178). P. 71–81.
4. Podzemnye atomnye stantsii: alternativa otkazu ot atomnoy energetiki [Underground nuclear power plants: alternative to refusal of nuclear energy] / E. N. Kamnev, E. A. Kotenko, V. F. Dorodnov, A. B. Zverev // Gornyi zhurnal. 2011. N 8. P. 4–8.
5. Kotenko E. A. Sozdanie podzemnykh atomnykh stantsiy [Construction of underground nuclear power plants]. М : TsNIIatominform, 1996. 95 p.
6. Kotenko E. A. Yadernye energokompleksy podzemnogo prostranstva [Nuclear energy complexes of underground space] // Gornyi zhurnal. 1995. N 9. P. 34–40.
7. Kokosadze A. E. Konstruktivno-tehnologicheskie resheniya ob'ektov podzemnoy atomnoy energetiki maloy moschnosti [Constructive and technological solutions of facilities of underground nuclear small power energy] // Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal). М. : Gornaya kniga. 2010. P. 337–341.
8. Muratov O. E. Podzemnye AES: effektivnost i bezopasnost [Underground nuclear power plants: efficiency and safety] // Voprosy atomnoy nauki i tehniki. 2002. N 6. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie (82). P. 19–29.

Сведения об авторах

Смирнов Юрий Геннадьевич – Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник;
Кольский филиал ПетрГУ, ст. преподаватель; e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Smirnov Yu. G. – Mining Institute KSC RAS, Researcher; Kola Branch of Petrozavodsk State University,
Senior Lecturer; e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Орлов Александр Орестович – Горный институт КНЦ РАН, науч. сотрудник;
e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru

Orlov A. O. – Mining Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru