

УДК 621.039.577:624.1 (985)
DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.10.161-169

А.О. Орлов, Ю.Г. Смирнов, В.В. Бирюков
Горный институт ФИЦ КНЦ РАН

АНАЛИЗ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ*

Аннотация

В статье рассмотрены основные предпосылки использования подземных атомных станций малой мощности (АСММ) и особенности строительства в арктических регионах России. Рассмотрены основные факторы по выбору конструктивно-компоновочных решений и обоснованию глубины заложения, способов доступа и параметров выработок. Приведены результаты анализа проектных решений подземных АСММ на основе ориентации подземных сооружений по функционально-технологическому принципу работы.

Ключевые слова:

арктические регионы, атомные станции малой мощности, подземное размещение, глубина заложения, способ доступа, конструктивно-компоновочные решения

A. O. Orlov, Y. G. Smirnov, V. V. Birykov

ANALYSIS OF DESIGN DECISIONS FOR UNDERGROUND COMPLEXES OF SMALL NUCLEAR POWER PLANTS IN ARCTIC

Abstract

The article considers the main prerequisites for the use of underground small nuclear power plants (SNPP) and features of construction in the Russian Arctic regions. The main factors on the choice of constructive-layout solutions and substantiation of the depth of location, methods of access and parameters of the excavations are described. Results of the analysis of design decisions of underground SNPP on the basis of the orientation of underground structures on the functional and technological work principle are presented.

Keywords:

Arctic regions, small nuclear power plants, underground disposition, depth of location, access method, constructive layout solutions

Введение

Освоение арктических регионов России является одной из главных приоритетных задач государственной политики в Арктике и ставит вопрос развития инженерной инфраструктуры в регионах многолетней мерзлоты, где комфортное проживание человека в суровых условиях весьма затруднительно.

Создание альтернативных источников энергии имеет большое политическое и экономическое значение для данных регионов, которые характеризуются отсутствием централизованного энергоснабжения, сложными природно-климатическими условиями, большими затратами на генерацию и транспортировку электроэнергии.

* Работа выполнена в рамках темы 0226-2018-0008 государственного задания Горного института КНЦ РАН.

Подземное размещение атомных станций малой мощности (АСММ) может стать недорогим альтернативным источником энергообеспечения в районах со сложными климатическими и транспортными условиями. Поэтому использование подземного пространства в условиях многолетнемерзлых пород является актуальной и важной задачей.

Общие положения. Основная идея сооружения АСММ заключается в создании безопасных подземных комплексов способных противостоять любому негативному воздействию. В существующем правовом поле законодательно закреплена приоритетность вопросов обеспечения безопасности атомных станций. В настоящее время, технически строительство подземных АСММ возможно, практически, в любых инженерно-геологических условиях.

Одно из главных мест в создании подземных комплексов отводится задачам, направленным на определение подземной архитектуры сооружения и рациональным конструктивно-компоновочным решениям. Среди основных факторов, влияющих на выбор компоновки подземного комплекса, следует отметить горно-геологические условия, технологические параметры строительства, технические показатели комплекса и ряд других.

Строительство в арктической зоне. В районах с многолетней мерзлотой, строительство подземных сооружений может сопровождаться оттаиванием или промерзанием пород. Температура в породном массиве и ее колебания так же изменяются с глубиной. Особенностью мерзлоты является то, что сезонные колебания температуры затухают на глубине 10–15 м, а на более низких глубинных отметках температура мерзлоты постоянна. Мерзлота практически не проницаема для жидкостей и газов.

При строительстве подземных АСММ в арктических условиях необходимо принимать во внимание целый ряд специфических факторов, связанных как с климатическими особенностями, так и с особенностями эксплуатации самого подземного объекта, основными из которых являются:

- техногенные воздействия, способные изменять физико-механические свойства вмещающего массива и строительных конструкций;
- повышенный температурный режим внутри камерных выработок, влияющий на напряженно-деформированное состояние горных пород;
- знакопеременный температурный режим на контактах строительных конструкций и породного массива;
- краткосрочное воздействие высоких давлений и температур при возможных аварийных ситуациях способные вызвать снижение несущей способности и противодиффузионной стойкости окружающего породного массива.

Технические характеристики. Подземная атомная станция включает в себя комплекс различного оборудования, систем защиты и управления. Технические характеристики комплекса связаны с используемым типом оборудования и параметрами горных выработок для них, к которым можно отнести: мощность, тип и целевое назначение реактора, габариты и компоновка основного оборудования, параметры главных вспомогательных выработок. Так же к важным параметрам, влияющим на конструкцию и компоновку подземного комплекса, следует отнести рельеф местности, глубину заложения основного горизонта, способ доступа к подземному комплексу с поверхности.

Рельеф местности. Рельеф для строительства подземного комплекса определяет возможность размещения поверхностного комплекса и организацию транспортной инфраструктуры. Главное влияние рельефа связано с определением предпочтительной схемы вскрытия (доступа в подземный комплекс), что напрямую затрагивает вопросы экономики, сроков строительства и обеспечения безопасности.

Способ доступа. Начало строительства связано со способом доступа к подземному комплексу через главную вскрывающую выработку. Определяющими в выборе способа доступа (вскрытия) являются горно-геологические условия и рельеф местности. К основным способам доступа относятся: при помощи *вертикальных* (шахтный ствол), *наклонных* (уклон, спиральный съезд) и *горизонтальных* выработок (штольня, тоннель), а также возможны различные их комбинации.

Вскрытие вертикальной выработкой применяется, в основном, при равнинном рельефе местности и является одним из сложных и трудоемких в горном строительстве. При гористом рельефе предпочтительнее использование горизонтальных выработок. Вскрытие наклонными выработками используется практически при любом рельефе. Экономически целесообразно проводить вскрытие до глубины 100 м, так как при большой протяжённости вскрывающих выработок, существенно повышается объём работ и стоимость строительства [1].

Глубина заложения. Обосновывается на основании параметров безопасности, с учетом приемлемых экономических затрат. Определяется толщиной горной породы, которая позволяет исключить процесс распространения радиоактивных выбросов в атмосферу при запроектной аварии и других возможных внутренних инцидентах.

Горные породы выдерживают динамические нагрузки на порядок больше, чем защитные конструкции атомных станций, расположенных на дневной поверхности.

С увеличением глубины расположения АСММ возрастают изолирующие свойства породного массива, повышается безопасность эксплуатации подземного комплекса, однако, наряду с этим увеличивается горное давление и затраты на поддержание горных выработок. По геомеханическим и экономическим параметрам оптимальным можно считать размещение АСММ на глубине 50-100 м.

Конструктивно-компоновочные решения. Все выработки подземного комплекса связаны с целевым назначением и ориентированы по функционально-технологическому принципу работы. Компоновка и выбор оптимальных параметров горных выработок подземной АСММ позволяет обеспечить длительную устойчивость подземного сооружения в течение всего срока эксплуатации[2].

Форма и размеры выработок. Форма и размеры поперечного сечения выработки должны обеспечивать необходимую технологическую возможность размещения в ней применяемого оборудования и инженерных коммуникаций, а также соблюдение необходимых требований техники безопасности при транспортировке оборудования и материалов, вентиляции и водоотлива. При расчете проектного сечения выработки в проходке кроме толщины крепи необходимо учитывать горно-геологические характеристики вмещающих пород.

Форму поперечного сечения выработки выбирается в зависимости от устойчивости пород, срока службы и назначения выработки.

Для горизонтальных выработок, как правило, принимается сводчатая форма поперечного сечения с вертикальными боковыми стенками. На рис. 1 показана принципиальная схема формирования геометрических параметров для всех типов горизонтальных выработок и камер.

Размеры поперечного сечения выработки определяются габаритами основного (L), подъёмного (C) и транспортного оборудования (A), необходимыми зазорами между крепью и указанным оборудованием (D), а также количеством воздуха, которое должно проходить по выработке. Необходимо, чтобы площадь поперечного сечения выработок обеспечивала перемещение по ним воздуха с регламентируемой скоростью.

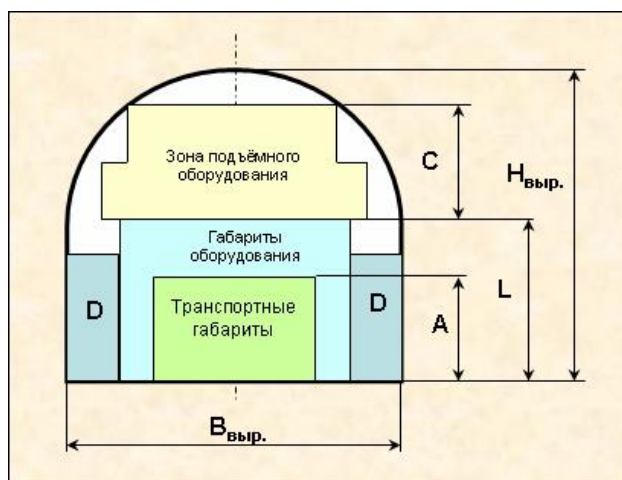


Рис. 1. Принципиальная схема формирования геометрических параметров выработки

$H_{\text{выр}}$ — высота выработки; $B_{\text{выр}}$ — ширина выработки

Методический подход. Основная идея сооружения АСММ заключается в создании безопасных подземных комплексов способных противостоять любому негативному воздействию. Научный подход к проектированию перспективных подземных комплексов, как сложных систем, основан на применении методов структурно-параметрических исследований, под которым понимается определение такой структуры проектных параметров, которая соответствовала техническому заданию и обеспечивала экстремум выбранного критерия качества [3].

Наиболее перспективным представляется использование специализированных автоматизированных систем проектирования на всех стадиях разработки от технического задания до выпуска проектной документации. Решение поставленной проблемы требует разработки системной модели АСММ как объекта проектирования. [4].

Вызывает интерес протекание процесса теплопередачи в массиве горных пород вследствие знакопеременных температур на контуре выработки. Стенка горной выработки нагревается теплым воздухом с температурой $15^0 - 20^0$ С от действия промышленного оборудования и формирует тепловой поток в глубину многолетнемерзлого горного массива.

На основе уравнения переноса энергии (1) была разработана математическая модель процесса теплопередачи

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{V}) \right) + S_h$$

где

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)$ - изменение полной энергии E единицы массы ρ со временем;

$\nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p))$ - компонент описывающий конвективный перенос энергии E единицей массы ρ в среде, движущейся со скоростью \vec{V} , и под давлением p ;

$\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$ - компонент описывающий кондуктивный перенос энергии, связанный с градиентом температур. В случае анизотропной среды используется коэффициент теплопередачи k_{ij} ;

$\nabla \cdot (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{V})$ - источник энергии, связанный с вязким трением в потоке жидкости;

$\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right)$ - источник энергии, связанный с появлением в системе новой

массы вследствие химических реакций или фазовых переходов,

S_h - поступление энергии из за границы расчетного объема

В массиве горных пород перенос энергии описывается упрощенным уравнением кондуктивного теплообмена.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{V} \rho h) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h$$

Разработанная математическая модель теплопереноса реализована в программном комплексе ANSYS Fluent (лицензия Горного института ФИЦ КНЦ РАН), имеющем возможность реализации модели переноса энергии в твердых телах в сочетании с конвективным теплообменом в жидкости и выделения энергии вследствие фазовых переходов и химических реакций.

В CAD редакторе Gambit на основе эскиза (рис 1) была разработана расчетная геометрия задачи (рис. 2). Площадь поперечного сечения выработки составляет 180 м^2 . Протяженность расчетной геометрии по вертикали и горизонтали равна 100м. В задаче такие размеры выбраны для компенсации погрешностей расчета, вносимых граничными условиями.

Разработанная математическая модель процесса переноса энергии в массиве горных пород выполнена в виде виртуального стенда, позволяющего проводить вычислительные эксперименты с различными граничными (рис. 3) и начальными условиями и различными физическими свойствами горных пород.

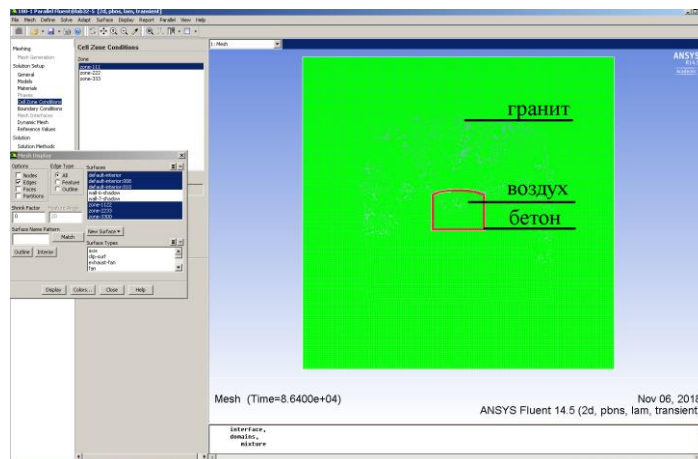


Рис. 2. Расчетная сетка плоской задачи передачи теплоты в горном массиве.

В таблице 1 приведены физические свойства твердых тел для вычислительного эксперимента, задаваемые в вычислительном эксперименте через диалоговое окно программы (рис. 4).

Таблица 1. Физические свойства материалов

	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность Вт/м*К	Теплоемкость Дж/кг*К
Воздух	1.225	0.0242	1006.43
Бетон	2300	1.69	840
Гранит	2450	2.4	880

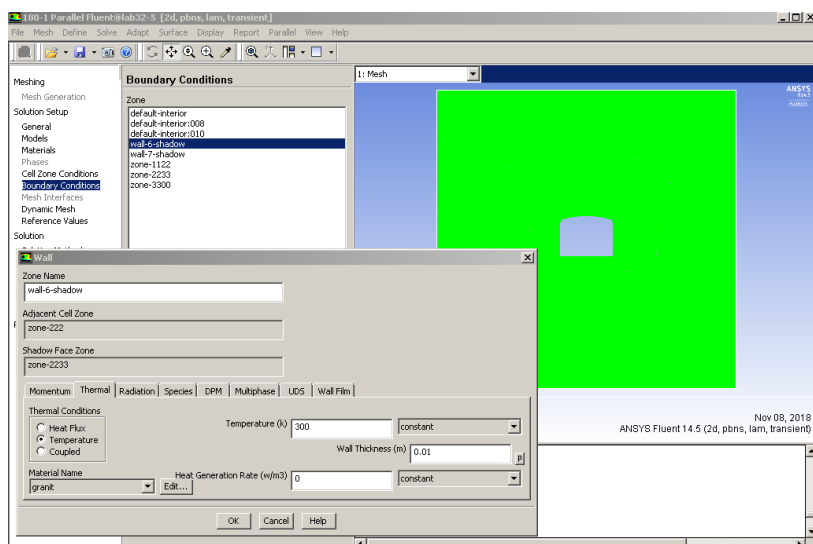


Рис. 3. Диалоговое окно задания граничных условий модели теплопереноса в горном массиве.

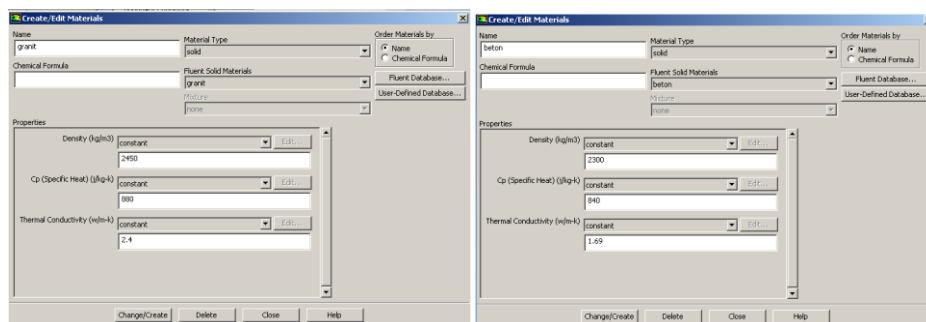


Рис. 4. Диалоговое окно задания свойств материалов

В результате проведения серии вычислительных экспериментов получена информация по тепловому состоянию горных пород с течением времени (рис.5, 6, 7).

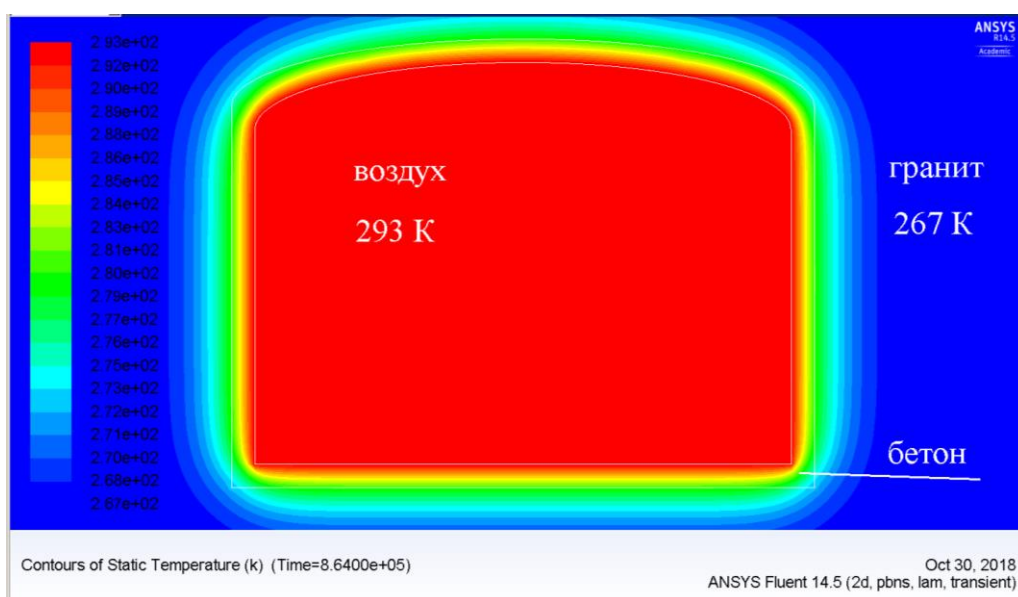


Рис. 5. Распределение температур на поперечном сечении выработки через 10 суток от начала процесса.

Заключение

В статье рассмотрены основные принципы создания подземных атомных станций малой мощности в районах многолетней мерзлоты.

Создание единого архитектурного решения подземного комплекса АСММ на основе отдельных выработок должно учитывать необходимость стабилизации основных температурных и физико-механических характеристик горных пород. Тепловая нагрузка на границе выработки приводит к изменению температуры слагающих горных пород, и, соответственно, изменению их физических свойств. Использование методов математического моделирования позволяет исследовать процессы, происходящие в горных породах с течением времени. Информация, полученная в результате проведения вычислительных экспериментов позволяет

прогнозировать напряженно деформированное состояние горных массивов, меняющееся в процессе строительства и последующей эксплуатации выработок.

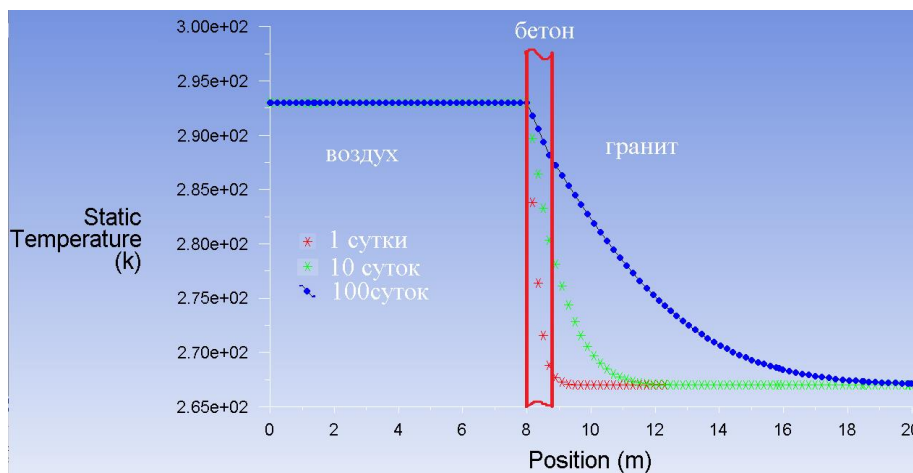


Рис. 6. Распределение температур в массиве горной породы по прошествии 1, 10, 100 суток

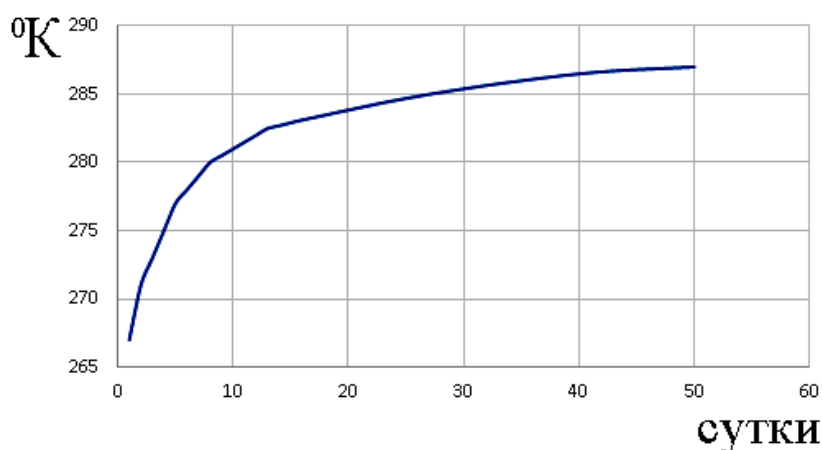


Рис. 7. График изменения температуры на границе горной выработки с течением времени

Литература

1. Орлов, А.О. Обоснование эффективных способов размещения подземных комплексов атомных станций малой мощности в российской Арктике / А.О. Орлов, Ю.Г. Смирнов. // Изв. вузов. Горн. журнал. - 2016. - №4. - С. 18-23.
2. Смирнов, Ю.Г. Анализ мирового опыта строительства подземных атомных станций и оценка возможности его использования для арктических регионов России / Ю.Г. Смирнов, А.О. Орлов. // Вестник МГТУ. - 2016. - Т.19. - № 1/1. - С. 47-52.
3. Лазарев, И.А. Композиционное проектирование сложных агрегатных систем / И.А. Лазарев - М.: Радио и связь - 1986. - 312 с.

4. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки в принятии плановых решений.
– М.: Экономика, 2008. – 256 с.

Сведения об авторах

Орлов Александр Орестович – научный сотрудник

e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru

Alexander O. Orlov – researcher

Смирнов Юрий Геннадьевич – научный сотрудник

e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru

Yuriy G. Smirnov – researcher

Бирюков Валерий Валентинович – научный сотрудник

e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru

Valeriy V. Birukov – researcher