

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

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

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ
В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ**



Издательство Кольского научного центра
2020

DOI:10.37614/978.5.91137.405.1

УДК 622.012:621.311:658.261

Н 34

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Авторы: Мельников Н. Н., Конухин В. П., Гусак С. А., Амосов П. В., Наумов В. А.,
Наумов А. В., Орлов А. О., Смирнов Ю. Г., Климин С. Г.

Рецензенты: Залуцкий А. А. — кандидат физико-математических наук;

Чуркин О. Е. — кандидат технических наук

Н 34 Научные основы создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики / Н. Н. Мельников [и др.] ; ответственный редактор С. А. Гусак. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — 304 с.: ил. ISBN 978-5-91137-405-1

Рассмотрены основные направления и результаты исследований Горного института Кольского научного центра РАН, целью которых являлась разработка научных и инженерных основ создания подземных комплексов атомных станций малой мощности и методических подходов для обоснования технологий строительства подземных станций в условиях криолитозоны. Представлены результаты оценки перспективной потребности арктических регионов в энергоустановках малой мощности, и определены области возможного применения АСММ в качестве автономных источников энергии для потребителей удаленных и труднодоступных территорий.

На базе математического моделирования физических процессов при эксплуатации подземных АСММ разработаны и апробированы методические подходы для обоснования рекомендаций, которые направлены на обеспечение различных аспектов безопасной эксплуатации подземных комплексов. На примере перспективных месторождений полезных ископаемых Якутии и Чукотского автономного округа представлены методические основы выбора и результаты оценки потенциальных площадок для размещения подземных АСММ с учетом инженерно-геологических, горнотехнических и социально-экономических факторов.

На основе решения задач, связанных с разработкой конструктивных и компоновочных моделей камерных выработок для размещения основного оборудования АСММ, рассмотрены основные принципы, на которых базируются концептуальные положения методологии создания подземных комплексов АСММ в условиях Арктики.

Издание предназначено для специалистов и представителей общественности, заинтересованных в решении проблемы обеспечения энергетической безопасности удаленных территорий в различных регионах мира, в том числе в арктических регионах, испытывающих потребности в малой энергетике. Ил. — 101, табл. — 87, библиогр. — 311 назв.

Монография подготовлена по материалам исследований, выполненных в Горном институте Кольского научного центра РАН в рамках государственных заданий по темам 0232-2014-0010, 0232-2014-0027 и 0226-2019-0026.

Научное издание
Редактор С. А. Шарам
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано в печать 24.01.2020. Формат бумаги 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 26.69. Заказ № 11. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-405-1

© Н.Н. Мельников, В. П. Конухин, С. А. Гусак,
П. В. Амосов, В. А. Наумов, А. В. Наумов,
А. О. Орлов, Ю. Г. Смирнов, С. Г. Климин, 2020
© Горный институт КНЦ РАН, 2020
© ФИЦ КНЦ РАН, 2020

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Russian Academy of Sciences

Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”

Mining Institute

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

**SCIENTIFIC BASES TO CONSTRUCT
UNDERGROUND COMPLEXES
FOR PLACING
SMALL NUCLEAR POWER PLANTS
IN THE ARCTIC**

Publishing House of the Kola Science Center
2020

DOI:10.37614/978.5.91137.405.1
UDC 622.012:621.311:658.261

Published by decision of the Editorial board of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”

Authors: Melnikov N. N. Konukhin V.P., Gusak S. A., Amosov P. V., Naumov V. A.,
Naumov A. V., Orlov A. O., Smirnov Yu. G., Kimin S. G.

Reviewers: Zalutskiy A.A., PhD (Phys.&Math.)
Churkin O. E., PhD (Eng.)

Scientific bases to construct underground complexes for placing small nuclear power plants in the Arctic / N. N. Melnikov [et al.]; Editor-in-chief S. A. Gusak. — Apatity : Kola Science Centre RAS, 2020. — 304 p.

ISBN 978-5-91137-405-1

The monograph describes the main directions and results of studies performed at the Mining Institute KSC RAS and aimed at developing scientific-engineering foundations and methodical approaches of construction of underground structures intended for small nuclear power plants (SNPPs) in the permafrost. The work presents the results of estimation of the perspective need of the Arctic regions in small power facilities and defines the areas of potential application of SNPPs as autonomous energy sources for the consumers of remote and inaccessible territories. Based on the mathematical modeling of physical processes while operating underground SNPPs, the authors developed and tested methodical approaches to substantiate the recommendations aimed at providing various aspects of safe operation of underground structures. The case study of promising mineral deposits in Yakutia and the Chukotka Autonomous Okrug has presented the methodical foundations for the selection and evaluation of underground SNPP potential siting, taking into account engineering-geological, mining and socio-economic factors.

The solution of the tasks associated with the development of structural and layout models of chamber workings intended for placing the SNPP main equipment has allowed considering the basic principles on which the conceptual methodology provisions for creating SNPP underground structures in the Arctic are based. Images — 101, tables — 87, references — 311.

The monograph is intended for the specialists and members of the public, who are interested in solving the energy security problems of remote areas in different regions of the world, including in the Arctic regions, experiencing the need for small energy.

The monograph is based on studies performed at the Mining Institute KSC RAS in the framework of the State Tasks on the themes 0232-2014-0010, 0232-2014-0027 and 0226-2019-0026.

ISBN 978-5-91137-405-1

© N. N. Melnikov, V. P. Konukhin, S. A. Gusak,
P. V. Amosov, V. A. Naumov, A. V. Naumov,
A. O. Orlov, Yu. G. Smirnov, S. G. Klimin, 2020
© Mining institute of the Kola science centre
of RAS, 2020
© Federal Research Centre “Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences”, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	11
ВВЕДЕНИЕ.....	13
Глава 1 ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРИМЕНЕНИЮ АСММ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ...	15
1.1. Области возможного применения АСММ для энергоснабжения объектов в арктических регионах....	17
1.2. Реакторные установки для энергоснабжения удаленных и труднодоступных территорий: проблема выбора.....	22
1.3. К вопросу об оценке эффективности использования АСММ для энергоснабжения арктических регионов.....	30
1.3.1. Методика сравнительной оценки и критерии для ранжирования инновационных проектов АСММ.....	30
1.3.2. Экспертная оценка эффективности проектов АСММ.....	40
Выводы по главе 1.....	47
Литература к введению и главе 1.....	47
Глава 2 ВЫБОР ПЛОЩАДОК ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АСММ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ С УЧЕТОМ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ, ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ.....	54
2.1. Анализ методологий выбора площадок для размещения АСММ в приповерхностных геологических формациях.	54
2.2. Критерии оценки площадок.....	61
2.3. Программа инженерно-геологических исследований на площадках размещения АСММ.....	64
2.4. Ранжирование площадок для размещения АСММ.....	66
2.5. Общий алгоритм оценки и выбора площадок для размещения АСММ.....	69
2.5.1. Методология выбора площадок	69
2.5.2. Учет инженерно-геологических, горнотехнических и социально-экономических особенностей при подземном размещении АСММ.....	79
2.6. Оценка потенциальных площадок для размещения АСММ в скальных породах при создании новых горнопромышленных предприятий в арктических регионах России.....	82
2.6.1. Томторское месторождение ниобий-редкоземельных руд в Якутии.....	82
2.6.2. Медно-порфировое месторождение Песчанка на Чукотке.....	92
Выводы по главе 2.....	99
Литература к главе 2.....	100

Глава 3	ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ АСММ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	103
	3.1. Тепловое взаимодействие подземной АСММ с вмещающим массивом многолетнемерзлых пород.....	104
	3.1.1. Влияние объемно-компоновочных решений подземного комплекса на тепловое взаимодействие.....	106
	3.1.2. Оценка способов управления криогенным состоянием породного массива.....	121
	3.2. Проблема отвода тепла от конденсаторов турбин АЭС и оценка теплового воздействия АСММ на водоем- охладитель в арктических условиях	130
	3.2.1. Проблема отвода тепла.....	130
	3.2.2. Оценка теплового воздействия АСММ на водоем-охладитель.....	133
	3.3. Оценка радиационного воздействия АСММ на окружающую среду при запроектной аварии.....	138
	3.3.1. Методология исследований.....	139
	3.3.2. Оценка радиоактивного загрязнения площадки размещения АСММ и дозовых нагрузок на население.....	141
	Выводы по главе 3.....	145
	Литература к главе 3.....	147
Глава 4	ВЛИЯНИЕ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА НА КОНСТРУКТИВНЫЕ И ОБЪЕМНО-КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ АСММ РАЗЛИЧНОГО ТИПА.....	154
	4.1. Оценка радиоактивности ОЯТ реакторов АСММ.....	155
	4.1.1. Реакторные установки малой мощности.....	156
	4.1.2. Методика исследований.....	157
	4.1.3. Радиоактивность ОЯТ водо-водяных реакторов АСММ и реакторов-прототипов с водой под давлением.....	158
	4.1.4. Радиоактивность ОЯТ реакторов типа СВБР.....	165
	4.1.5. Обсуждение результатов.....	167
	4.1.6. Оценка накопления гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ реакторных установок АСММ.....	168
	4.2. Обоснование типа хранения ОЯТ в подземных модулях АСММ.....	175
	4.2.1. Концептуальные представления об обращении с ОЯТ реакторов АСММ.....	175
	4.2.2. Обоснование хранения ОЯТ реакторов АСММ в контейнерах ТУК-120.....	176
	4.2.3. Характеристика контейнерного хранения ОЯТ в подземных модулях АСММ.....	119
	4.3. Оценка радиационной безопасности подземных хранилищ контейнерного типа для ОЯТ АСММ.....	182
	4.3.1. Мощность дозы от гамма-излучения.....	182

	4.3.2. Мощность дозы от нейтронов спонтанных делений.....	190
	4.3.3. Характеристика радиационной безопасности хранилищ ОЯТ контейнерного типа, размещаемых в подземных модулях АСММ.....	194
	4.4. Оценка ядерной безопасности подземных хранилищ ОЯТ реакторов АСММ.....	196
	4.5. Оценка тепловой безопасности подземных хранилищ ОЯТ реакторов АСММ.....	202
	4.5.1. Остаточные тепловыделения в ОЯТ реакторов АСММ.....	203
	4.5.2. Температурный режим контейнеров ТУК-120....	206
	4.6. Параметры площадок в подземных модулях для размещения контейнеров с ОЯТ.....	213
	Выводы по главе 4.....	215
	Литература к главе 4.....	215
Глава 5	ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ АСММ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ.....	220
	5.1. Обоснование общих концептуальных представлений о подземных комплексах АСММ различного типа.....	220
	5.1.1. Общие положения о подземном комплексе АСММ	220
	5.1.2. Основные принципы обеспечения безопасности	226
	5.1.3. Формирование факторов для выбора конструктивных элементов подземных АСММ...	230
	5.2. Обоснование конструктивных и объемно-компоновочных моделей подземных комплексов АСММ.....	233
	5.2.1. Оценка параметров подземных выработок для размещения основного оборудования АСММ с реакторными установками различного типа.....	233
	5.2.2. Оценка конструктивных и компоновочных решений подземных комплексов АСММ.....	242
	5.2.3. Анализ компоновочных решений подземных комплексов АСММ.....	249
	5.3. Методические подходы для обоснования технологий строительства подземных АСММ в арктических условиях..	256
	5.3.1. Формирование методических принципов в области проектирования и технологии строительства подземных комплексов АСММ...	256
	5.3.2. Отдельные элементы технологии строительства подземных АСММ в условиях многолетней мерзлоты.....	259
	5.3.3. Теплоизоляционные системы и материалы в условиях отрицательных температур.....	275
	5.3.4. Ориентировочная оценка технико-экономических показателей строительства подземных АСММ с реакторными установками различного типа.....	284
	Выводы по главе 5.....	290
	Литература к главе 5.....	291
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	296

CONTENTS

		Page
	LIST OF ABBREVIATIONS.....	11
	INTRODUCTION.....	13
Chapter 1	PREREQUISITES TO USE SNPPS FOR POWER SUPPLY OF THE ARCTIC REGIONS.....	15
	1.1. Areas of potential application of SNPPs for power supply of objects in the Arctic regions.....	17
	1.2. Reactor units for power supply of remote and inaccessible territories: selection issues.....	22
	1.3. Efficiency assessment of SNPPs use for power supply of the Arctic regions.....	30
	1.3.1. SNPP innovative projects: comparative assessment method and ranking criteria.....	30
	1.3.2. SNPP projects efficiency: expert assessment...	40
	Summary.....	47
	References.....	47
Chapter 2	SITE SELECTION FOR THE PLACEMENT OF UNDERGROUND SNPP IN SUBSURFACE GEOLOGICAL FORMATIONS TAKING INTO ACCOUNT OF GEOLOGICAL, MINING AND SOCIO-ECONOMIC FACTORS.....	54
	2.1. Analysis of SNPP site selection methodologies in subsurface geological formations.....	54
	2.2. Site assessment criteria.....	61
	2.3. Engineering-geological study program at SNPP siting	64
	2.4. SNPP siting ranking.....	66
	2.5. Siting of SNPPs: general algorithm of assessment and selection.....	69
	2.5.1. Selection methodology sites.....	69
	2.5.2. Underground siting of SNPPs: engineering-geological, mining and socio-economic features.....	79
	2.6. Assessment of potential siting of SNPPs in hard rocks when constructing new mining enterprises in the Russia's Arctic regions.....	82
	2.6.1. The Tomtor niobium-rare-earth deposit (Yakutia).....	82
	2.6.2. The Peschanka copper-porphyry deposit (Chukotka).....	92
	Summary.....	99
	References.....	100
Chapter 3	ECOLOGICAL SAFETY ASPECTS OF UNDERGROUND SNPPS IN THE ARCTIC CONDITIONS.....	103
	3.1. Thermal interaction of an underground SNPP with the host permafrost rock massif.....	104

	3.1.1. Influence of space-layout solutions for an underground complex on the thermal interaction.....	106
	3.1.2. Assessment of ways to control the cryogenic state of the rock massif.....	121
	3.2. Issue of heat removal from NPP turbine condensers and assessment of SNPP thermal impact on a cooling pond in the Arctic conditions.....	130
	3.2.1. Heat removal issue.....	130
	3.2.3. Assessment of SNPP thermal impact on a cooling pond.....	133
	3.3. Assessment of SNPP radiation impact on environment when the beyond design-basis accident.....	138
	3.3.1. Research methodology.....	139
	3.3.2. Assessment of radioactive pollution of SNPP siting and of dose loads on the population.....	141
	Summary.....	145
	References.....	147
Chapter 4	FUEL CYCLE INFLUENCE ON CONSTRUCTIVE AND SPACE-LAYOUT SOLUTIONS FOR SNPP UNDERGROUND COMPLEXES OF DIFFERENT TYPE.....	154
	4.1. SNPP spent nuclear fuel radioactivity assessment.....	155
	4.1.1. Small power reactor facilities.....	156
	4.1.2. Research methodology.....	157
	4.1.3. SNF radioactivity of SNPP light water reactors and pressurized water prototype reactors.....	158
	4.1.4. SNF radioactivity of SVBR-type reactors.....	165
	4.1.6. Accumulation assessment of gamma-emitting radionuclides ^{134}Cs и ^{154}Eu in SNF of SNPP reactor facilities	167
	4.2. Substantiation of SNF storage types in SNPP underground modules.....	175
	4.2.1. Conceptual representations on SNPP spent nuclear fuel management.....	175
	4.2.2. Substantiation of SNPP spent nuclear fuel storage in TUK-120 containers.....	176
	4.2.3. Characteristics of SNF container-type storage in SNPP underground modules.....	179
	4.3. Radiation safety assessment of underground container storage facilities for SNPP spent nuclear fuel.....	182
	4.3.1. Dose rate from gamma radiation.....	182
	4.3.2. Dose rate from spontaneous fission neutrons...	190
	4.3.3. Radiation safety characteristics of SNF container storage facilities placed in SNPP underground modules.....	194
	4.4. Nuclear safety assessment of underground storage facilities for SNPP spent nuclear fuel.....	196

	4.5. Thermal safety assessment of underground storage facilities for SNPP spent nuclear fuel.....	202
	4.5.1. Residual heat in SNPP spent nuclear fuel.....	203
	4.5.2. Temperature regime of TUK-120 containers....	206
	4.6. Parameters of SNF container siting.....	213
	Summary.....	215
	References.....	215
Chapter 5	CONSTRUCTION OF SNPP UNDERGROUND COMPLEXES IN THE ARCTIC CONDITIONS: MAIN METHODOLOGY PROVISIONS.....	220
	5.1. Substantiation of general conceptual representations about SNPP underground complexes of different type.....	220
	5.1.1. General provisions about an SNPP underground complex.....	220
	5.1.2. Safety fundamentals.....	226
	5.1.3. Formation of factors to select underground SNPP structural elements.....	230
	5.2. Substantiation of constructive and space-layout models of SNPP underground complexes.....	233
	5.2.1. Assessment of underground working parameters to locate the SNPP main equipment with reactor facilities of different type.....	233
	5.2.2. Assessment of constructive and layout solutions for SNPP underground complexes....	242
	5.2.3. Analysis of layout solutions for SNPP underground complexes.....	249
	5.3. Methodical approaches for substantiation of construction technologies for underground SNPPs in the Arctic conditions.....	256
	5.3.1. Formation of methodical principles for design and a construction technology for SNPP underground complexes.....	256
	5.3.2. Separate elements of a construction technology for underground SNPPs in permafrost condition.....	259
	5.3.3. Thermal insulation systems and materials at negative temperatures.....	275
	5.3.4. Approximate assessment of technical and economic indicators of underground SNPP construction with reactor facilities of different type.....	284
	Summary.....	290
	References.....	294
	CONCLUSIONS.....	296

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ — активная зона
АО — акционерное общество
АПЛ — атомная подводная лодка
а/л — атомный ледокол
АС — атомная станция
АСММ — атомная станция малой мощности
АТЭЦ — атомная теплоэлектроцентраль
АЭС — атомная электрическая станция
ВВП — валовый внутренний продукт
ВОЗ — возникновение очагов землетрясений
ВП — выгорающий поглотитель
ВВЭР — водо-водяной энергетический реактор
ВНИИГ — Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
ВЭС — ветряная электрическая станция
ГРЭ — геолого-разведочная экспедиция
ГРЭС — государственная районная электрическая станция
ГТУ — газотурбинная установка
ГТЭС — газотурбинная электростанция
ГУП — государственное унитарное предприятие
ДЭС — дизельная электростанция
ЗО — защитная оболочка
ЕЭС — единая энергетическая система
КВ — капиталовложения
КИУМ — коэффициент использования установленной мощности
КНЦ РАН — Кольский научный центр Российской академии наук
КПД — коэффициент полезного действия
ЛЭП — линия электропередач
МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии
ММГП — многолетнемерзлые горные породы
МОЭ — мощность остаточного энерговыделения
МПА — максимальная проектная авария
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение
НАО — Ненецкий автономный округ
НИКИЭТ — Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала
НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НПО — научно-производственное объединение
ОАО — открытое акционерное общество
ОВОС — оценка воздействия на окружающую среду
ОКБМ — опытное конструкторское бюро машиностроения
ООПТ — особо охраняемые природные территории
ОЯТ — отработавшее ядерное топливо
ПАС — подземная атомная станция
ПАТЭС — плавучая атомная теплоэлектростанция
ПГУ — парогазовая установка
ПД — продукты деления

ПЗ — проектное землетрясение
ПК — программный комплекс
ПНГ — попутный нефтяной газ
ППН — плотность потока нейтронов
ПТБ — плавучая техническая база
ПХ — приреакторное хранилище
ПЭЛ — поглощающий элемент
РАО — радиоактивные отходы
РБМК — реактор большой мощности канальный
РИН — рабочий источник нейтронов
РИД — результаты интеллектуальной деятельности
РКД — рабочая конструкторская документация
РО — реакторное отделение
РУ — реакторная установка
СВП — стержневой выгорающий поглотитель
СМП — Северное машиностроительное предприятие
СПГ — сжиженный природный газ
СУЗ — система управления и защиты
СЧ — составные части
ТВС — тепловыделяющая сборка
твэл — тепловыделяющий элемент
ТК — технологический канал
ТО — турбинное отделение
ТУК — транспортный упаковочный комплект
ТЭД — технико-экономический доклад
ТЭО — технико-экономическое обоснование
ТЭЦ — теплоэлектроцентраль
ФЭИ — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского
ХОЯТКТ — хранилище отработавшего ядерного топлива контейнерного типа
BWR (Boiling Water Reactor) — кипящий водо-водяной реактор
LCOE — нормированная на срок жизни станции стоимость единицы электроэнергии (включая все возможные затраты, доходы и инвестиции, в том числе с учетом фактора дисконтирования)
PWR (Pressurized Water Reactor) — водо-водяной реактор (реактор с водой под давлением)

ВВЕДЕНИЕ

Общие тенденции и опыт развития мировой энергетики все более убедительно свидетельствуют об отсутствии разумной альтернативы атомным станциям. Однако ряд тяжелых аварий, которые произошли на объектах атомной энергетики, с одной стороны, в определенной степени подорвали доверие к атомным источникам энергии, 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 разработки принципиально новых конструкций реакторных установок и систем безопасности, а также совершенствование управления атомно-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 заявлять об абсолютной безопасности даже для атомных станций, оснащенных реакторами нового поколения с присущими им свойствами самозащищенности. Такие свойства, в частности, характерны для современных разработок реакторных установок малой мощности интегрального типа. Наличие сложных и взаимосвязанных систем, включая гидравлические, не позволяет полностью исключить вероятность аварии на атомных станциях. Анализ аварийных ситуаций на ядерных объектах позволяет говорить также о существенном влиянии человеческого фактора на риск возникновения внутренних инцидентов, которые могут проявляться при нарушении персоналом технологии управления радиационно опасным объектом. Важным фактором, потенциально определяющим 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 назначения позволяет сделать вывод о том, 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 обеспечена при подземном размещении реакторных установок.

Использование подземного пространства для размещения атомных станций как научно-техническое направление сформировалось на основе опыта эксплуатации подземных атомных станций, построенных в различных странах в 1960-х гг.

В конце 1980-х и начале 1990-х гг. Горным институтом КНЦ РАН (научный руководитель по горнотехническому комплексу подземной станции) при сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими и технологическими организациями страны были выполнены комплексные научно-исследовательские 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 РУ различного типа и мощности [1–3].

Построенные в 1960-х гг. в ряде стран ПАС и исследовательские реакторы удовлетворяли частным требованиям к внешним воздействиям, исходя из специфики реакторной установки, задач станции и военно-политической обстановки того времени. Многочисленные проектно-конструкторские разработки для ПАС, выполненные в различных странах в 1970–1980-х гг., также велись по индивидуальным требованиям к внешним воздействиям. При этом характеристики таких воздействий носили, как правило, качественный характер [4, 5]. В рамках обоснования концепции головных ПАС был рассмотрен более широкий спектр вероятных воздействий, включая воздействия от диверсий, террористических актов и локальных военных конфликтов, в т. ч. с использованием высокоточных средств поражения. Результаты исследований позволили сделать вывод: массивы горных пород, прежде всего скальных, 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. Установлено также 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 гг. 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 неучитывание 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 ПАС и массиву горных пород, а также оптимизации объемно-компоновочных решений. Результаты исследований позволили заключить следующее: 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.

Научно-исследовательские работы, выполненные в этот период времени, послужили фундаментом для формирования научно-технического потенциала специалистов Горного института в области изучения физико-технических и инженерно-геологических проблем использования подземного пространства для размещения объектов атомной энергетики, в т. ч. в арктических регионах России.

В настоящей работе представлены основные направления и некоторые результаты исследований Горного института, целью которых является разработка научных основ и методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики.

Необходимо отметить, что все исследования Горного института по проблеме использования подземного пространства для размещения объектов атомной энергетики проводились под научным руководством академика Николая Николаевича Мельникова, который безвременно ушел из жизни в 2018 г.

Глава 1

ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРИМЕНЕНИЮ АСММ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

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 для различных нужд обеспечить гибкое и эффективное производство энергии [7–10].

В нашей стране актуальность проблемы развития локальной энергетики на основе использования таких энергоисточников проявляется в особой степени для удаленных территорий арктических регионов, где энергетическая безопасность не может быть полностью обеспечена на основе централизованного энергоснабжения [11]. В этих условиях в решении задачи надежного энергоснабжения объектов социального, промышленного и военно-стратегического назначения решающая роль принадлежит локальным энергосистемам, в основе которых лежит использование малой энергетике.

Энергетическая инфраструктура этих регионов характеризуется наличием множества обособленных энергоузлов, разрозненностью потребителей энергоресурсов и северным завозом органического топлива. Наличие северного завоза является отдельной проблемой, которая определяет энергетическую безопасность для удаленных и труднодоступных территорий. При осуществлении этой дорогостоящей процедуры доля транспортной составляющей в структуре стоимости топлива может достигать 70 %, что обуславливает высокую себестоимость производства энергии — в 5–10 раз выше, чем на электростанциях крупных энергоузлов. Ежегодные субвенции на выравнивание тарифов, предоставляемые из бюджетов различных уровней, оцениваются в несколько десятков миллиардов рублей, что составляет в некоторых регионах до 20–30 % от расходов бюджета [12, 13].

В качестве примера приведем результаты исследований, выполненных специалистами Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова с целью количественной оценки надежности топливо- и энергообеспечения отдельных районов Якутии [14]. Эти исследования проводились на основе индикативного метода анализа энергетической безопасности территорий регионального уровня, сущность которого заключается в определении степени кризисности состояния энергетической безопасности (нормальная, предкризисная или кризисная) путем сравнения индикативных показателей, рассчитанных для изучаемого объекта, с их пороговыми значениями. В обобщенном виде результаты исследования иллюстрирует рис. 1.1, на котором приведено районирование территории Якутии по степени обеспеченности электрической и тепловой энергией и всеми видами топлива.

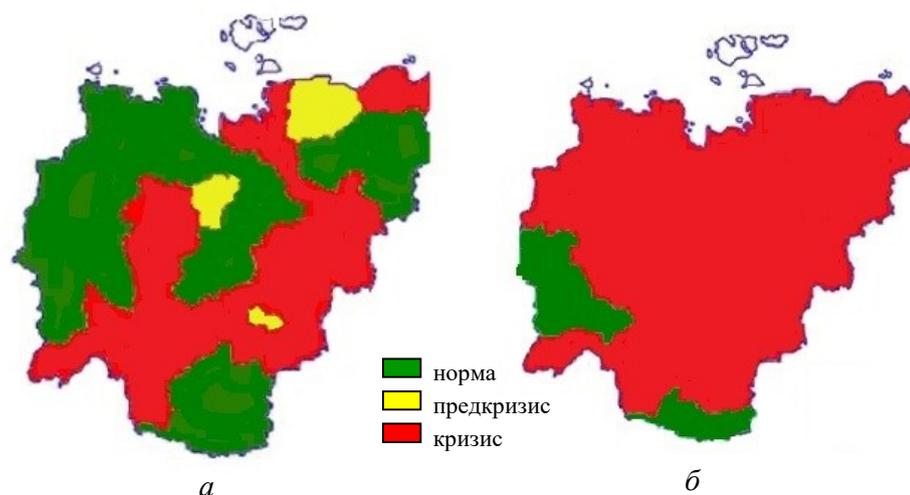


Рис. 1.1. Карты районирования субъектов Республики Саха (Якутия) по обеспеченности электрической и тепловой энергией (а) и топливом (б) [14]

Как видно из рис. 1.1, все арктические районы Якутии в части обеспеченности топливом относятся к территориям с кризисной ситуацией, которая обусловлена, прежде всего, сильной зависимостью энергоизолированных районов от внешних поставщиков дизельного топлива.

Указанный фактор, характерный для децентрализованной зоны энергетического комплекса Якутии, определяет специфику республиканской тарифной политики — перекрестное субсидирование населения, заключающееся в распределении высоких тарифов дизельной энергетики между остальными потребителями в централизованной зоне, в основном промышленного сектора. Такая тарифная политика вынуждает потребителей промышленного сектора строить собственные генерирующие мощности, что негативным образом сказывается на инвестиционной привлекательности, развитии энергетики и на энергетической безопасности всей республики [14].

Аналогичная ситуация свойственна большинству территорий в зонах децентрализованного энергоснабжения, характеризующихся суровым климатом, тяжелыми и дорогими условиями доставки топлива и грузов, удаленностью от центров снабжения.

Из анализа современной российской экономической и энергетической ситуации следует, что реально выполнимым решением проблемы энергообеспечения в труднодоступных регионах является использование атомных станций малой мощности стационарного или транспортабельного типа с заводским изготовлением энергоблоков малых мощностей. Такой вывод вытекает из совокупности фактов роста чрезвычайных ситуаций в периферийных энергосистемах (т. е. назревшей необходимости усиления звена автономных энергоисточников малой мощности) и гораздо большей вероятности сконцентрировать средства именно малыми порциями и с меньшим риском для их реализации [15]. Вовлечение АСММ в местную и локальную энергетику может существенно улучшить перспективы этого сектора энергетики, в том числе в топливной структуре за счет сокращения потребления мазута и угля в производстве тепловой и электрической энергии.

Говоря о перспективах использования АСММ в составе локальных и местных энергокомплексов, отметим, что определяющим фактором в решении проблемы развития данного сектора энергетики является реальная потребность в малых энергоисточниках, которая, в свою очередь, определяется с учетом экономического состояния и перспектив развития регионов [16].

1.1. Области возможного применения АСММ для энергоснабжения объектов в арктических регионах

Индустриальное освоение Арктики и формирование пространственной экономической структуры началось, когда, с одной стороны, в основе размещения производства лежали военно-стратегические интересы, а с другой — экономика Севера формировалась как часть единого народнохозяйственного комплекса. В результате экономика арктических регионов РФ имеет очаговый тип промышленно-хозяйственного освоения территорий, высокую ресурсоемкость и значительную зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от «северного завоза» (от поставок продовольствия, товаров народного потребления, продукции производственно-технического назначения, топлива). Сложившаяся структура экономики большинства арктических регионов слабо диверсифицирована и носит моноотраслевой характер с превалированием горнодобывающей промышленности [17].

Одной из особенностей развития арктических территорий также является пространственное развитие российской Арктики, где можно выделить две группы [17, 18]:

- старопромышленные регионы (Мурманская и Архангельская области, Норильский промышленный и Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный районы Красноярского края), освоение которых началось более 75 лет назад;
- арктические регионы относительно недавнего масштабного промышленного освоения (30–40 лет назад): Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Чукотский автономные округа, арктические районы Республики Саха (Якутия).

Особенность пространственного развития арктических регионов в определенной степени сказалась и на развитии их энергетической инфраструктуры. Одной из важных проблем энергетической безопасности этих регионов является изношенность энергетического комплекса, степень износа основных средств которого превышает 60 %. При этом ожидаемые темпы прироста регионального ВВП Арктики опережают темпы развития энергетики и прогнозируются на уровне 250 % в 2020 г. по отношению к 2007 г. Проблемы энергетической инфраструктуры и существующие противоречия между планами развития промышленности и энергетики Арктики могут существенно замедлить социально-экономическое развитие арктических регионов. Эти проблемы в большей степени касаются районов Сибири и Дальнего Востока и в меньшей — Мурманской и Архангельской областей, поскольку последние частично входят в зону покрытия Единой энергетической системой Российской Федерации [13].

Стратегической целью региональной энергетической политики в Российской Федерации является создание устойчивой и способной к саморегулированию системы обеспечения региональной энергетической безопасности с учетом оптимизации территориальной структуры производства и потребления топливно-энергетических ресурсов [19]. Для достижения этой

цели в арктических регионах разработаны соответствующие стратегические и программные документы, в которых определены задачи и меры по развитию энергетической инфраструктуры и надежности энергоснабжения потребителей.

Региональные стратегические и программные документы, направленные на развитие энергетической инфраструктуры арктических регионов, предусматривают строительство объектов малой энергетики, которой отводится определяющая роль в обеспечении энергетической безопасности удаленных и труднодоступных территорий. Планируется, что решение этой задачи будет базироваться в основном на применении традиционных энергоисточников, работающих на углеводородном топливе, и возобновляемых источников на основе гибридных (ветродизельных) электростанций. Как отмечалось ранее, в качестве альтернативных энергоисточников в системе локальной энергетики для энергоснабжения арктических регионов рассматриваются атомные станции малой мощности.

Исследования по обоснованию различных вариантов развития энергоснабжения децентрализованной зоны восточных регионов России ведутся с 1980-х гг. в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. На основе выполненных исследований были определены приоритетные направления развития локальной энергетики и сформулированы условия конкурентоспособности различных энергоисточников по сравнению с традиционной схемой «ДЭС+котельная», которая рассматривается как раздельная схема энергоснабжения, когда электрической энергией потребитель обеспечивается от дизельной электростанции, а тепловой — от котельной. В рамках этих исследований была выполнена оценка эффективности различных вариантов децентрализованного энергоснабжения [12, 20, 21]:

- мини-ТЭЦ на местных видах топлива;
- дизельные электростанции и газотурбинные установки с отбором тепла;
- возобновляемые источники энергии;
- атомные станции малой мощности.

Кратко представляя результаты этих исследований, можем отметить, что для промышленных потребителей Восточного арктического сектора, как существующих, так и новых, ориентированных на автономное энергоснабжение, более целесообразно использовать когенерационную схему (комбинированное обеспечение электрической и тепловой энергией от одного источника). Строительство мини-ТЭЦ на местных видах топлива, угле или природном газе локальных месторождений является довольно капиталоемким вариантом. Однако себестоимость производства электроэнергии на них в два раза ниже, чем на дизельных электростанциях, что позволяет рекомендовать этот вариант для потребителей, расположенных вблизи месторождений угля и газа.

В буферной зоне трасс газопроводов, кроме того, эффективен перевод ДЭС на природный газ и использование оборудования с когенерацией тепла. Результаты исследований по определению зон экономической целесообразности использования газа на дизельных электростанциях свидетельствуют о достаточно высокой эффективности этого мероприятия.

Проведенный сравнительный анализ технико-экономических показателей проектов возобновляемых источников энергии показал, что данные проекты для промышленных потребителей характеризуются значительными энергетическими нагрузками и пока не являются коммерчески привлекательными.

Для новых горнопромышленных предприятий, которые предполагается размещать в арктических регионах, где отсутствует энергетическая инфраструктура, по мнению специалистов Института систем энергетики СО РАН, в качестве альтернативы традиционному варианту следует рассматривать строительство АСММ. Рациональным местом размещения АСММ являются труднодоступные районы со сложной схемой доставки топлива и значительным перспективным ростом электрических нагрузок, связанным с разработкой месторождений полезных ископаемых.

Результаты исследований по оценке конкурентоспособности АСММ по сравнению со схемой ДЭС+котельная показали, что для максимальных значений ценовых показателей топлива в восточных регионах России (36 тыс. руб/т дизельного топлива и 3,4 тыс. руб/т угля) удельные капиталовложения в АСММ не должны превышать 270 тыс. руб/кВт.

Оценка сравнительной эффективности использования АСММ позволила также определить граничные значения себестоимости производства электроэнергии для достижения их конкурентоспособности [20]:

- как автономный энергоисточник — 13–17 руб/кВт·ч;
- в локальной энергосистеме — 4–6 руб/кВт·ч.

На основе многофакторного анализа транспортной и энергетической инфраструктуры в труднодоступных районах специалистами вышеупомянутого института были определены первоочередные проекты использования АСММ при освоении перспективных месторождений полезных ископаемых в арктических регионах:

- медно-порфировое месторождение «Песчанка» (Чукотский автономный округ);
- месторождение рудного золота «Кючус» и Томторское месторождение ниобий-редкоземельных руд в Якутии.

Еще одной потенциальной площадкой размещения АСММ является Павловское месторождение полиметаллических руд на Новой Земле. В соответствии с проектом освоения этого месторождения в качестве базового варианта энергообеспечения объектов инфраструктуры горнопромышленного предприятия рассматривалось использование газотурбинных установок, работающих на сжиженном природном газе. В зависимости от производственных мощностей горнопромышленного предприятия требуемая электрическая мощность оценивается в 30–40 МВт. Для такой энергетической мощности прогнозируемое годовое потребление СПГ составит примерно 50–60 тыс. т [22].

Перспектива реализации такого варианта энергоснабжения в значительной мере определяется возможностью и целесообразностью создания портового комплекса, оснащенного инфраструктурой приема-хранения СПГ. Можно выделить два обстоятельства, которые могут способствовать практической реализации данного варианта энергообеспечения Павловского месторождения.

Первое обусловлено созданием портового комплекса, который в соответствии с проектом освоения Павловского месторождения предполагается использовать для отгрузки и последующей транспортировки продукции горнопромышленного предприятия для переработки [22]. В настоящее время проводятся работы по переоборудованию атомного лихтеровоза «Севморпуть» с целью его использования для доставки продукции от Павловского месторождения к потребителям [23, 24].

Второе обстоятельство связано с реализацией масштабного проекта «Ямал СПГ», в рамках которого строится завод по сжижению природного газа. Именно с данного предприятия может быть осуществлена поставка СПГ на Новую Землю для энергообеспечения месторождения на основе газотурбинных установок. Для обеспечения топливом таких энергоисточников должно быть предусмотрено создание танкерного флота ледового класса [23]. Решение указанной задачи осуществляется в рамках проекта «Ямал СПГ», в соответствии с которым спроектированы и строятся специальные танкеры усиленного ледового класса «Arc7» (по российской классификации), позволяющие осуществлять круглогодичную навигацию без ледокольной проводки в западном направлении и в течение арктического лета — в восточном направлении по Северному морскому пути [25].

Таким образом, практическая реализация варианта энергообеспечения при освоении и разработке Павловского месторождения с использованием газотурбинных установок предполагает развитие инвестиционной деятельности на основе коммерческого партнерства между компаниями, которые осуществляют, с одной стороны, добычу и переработку свинцово-цинковых руд месторождения, а с другой — производство сжиженного природного газа.

В настоящее время в качестве альтернативы рассмотренному варианту энергообеспечения инфраструктуры на Павловском месторождении рассматривается вариант энергоснабжения на основе использования атомной станции малой мощности [26, 27].

Сильная зависимость надежности энергообеспечения любого потребителя на основе использования ДЭС от сезонных поставок дизельного топлива определяет целесообразность рассмотрения варианта использования АСММ и для энергоснабжения объектов инфраструктуры в порту Тикси, модернизация которой связана с возобновлением и развитием функционирования Северного морского пути. Стоит отметить, что в качестве альтернативного варианта энергоснабжения может рассматриваться использование газотурбинных установок, работающих на сжиженном природном газе. Привлекательность такого варианта обусловлена строительством порта Сабетта, который является ключевым элементом транспортной инфраструктуры проекта «Ямал-СПГ» и который должен сыграть роль одной из опорных точек Северного морского пути. Реализация такого варианта в значительной мере определяется возможностью и целесообразностью расширения портового комплекса Тикси, оснащенного инфраструктурой приема-хранения СПГ. Это, в свою очередь, предполагает развитие инвестиционной деятельности на основе коммерческого партнерства между компаниями, которые осуществляют развитие Северного морского пути, и производителем сжиженного природного газа.

Другим перспективным альтернативным проектом использования АСММ является энергоснабжение арктических военных объектов.

Действия приарктических и других государств по наращиванию своего экономического и военного присутствия в Арктике объективно требуют от Российской Федерации обеспечения благоприятного оперативного режима в Арктической зоне РФ, включая поддержание необходимого боевого потенциала группировок войск общего назначения Вооруженных сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов в этом регионе. Такие меры обеспечения национальной безопасности определены в качестве одной

из главных целей государственной политики РФ в Арктике [28]. Для достижения этой цели Министерством обороны России выполняется комплекс мероприятий, которые, в частности, направлены на создание группировки войск общего назначения для защиты национальных интересов Российской Федерации в Арктике и развитие военной инфраструктуры в арктическом регионе [11, 29].

Всего в Арктической зоне планируется построить 6 военных городков, 13 аэродромов, наземный авиационный полигон, 10 технических позиций для радиолокационных станций и пунктов наведения авиации [30].

В настоящее время единственный исполнитель программы сооружения объектов Минобороны России в арктической зоне — Федеральное агентство специального строительства (Спецстрой России), крупнейший участник арктической строительной программы до 2020 г. в России [31]. Основными задачами этого специализированного ведомства, в частности, являются [32]:

- строительство объектов специального и производственного назначения, обеспечивающих оборону и безопасность государства;
- строительство и реконструкция предприятий и организаций ядерного комплекса.

Задача по развитию военной инфраструктуры в Арктике обуславливает необходимость поиска эффективных решений по обеспечению энергетической безопасности военных объектов с учетом региональных условий их размещения, которым должны соответствовать технические и эксплуатационные параметры энергоисточников. По данным специалистов Спецстроя, практически все объекты военно-стратегического присутствия Российской Федерации в Арктике размещены в зоне децентрализованного энергоснабжения (см. рис. 1.2).



Рис. 1.2. Условия энергообеспечения военных объектов на удаленных территориях [31]

Прогнозные оценки перспективных нагрузок показывают: для энергоснабжения этих объектов должны рассматриваться генерирующие источники установленной электрической мощности в диапазоне от 0,5 до 10 МВт в расчете на 1 объект (в зависимости от тактико-технических характеристик) [31, 33].

С целью обоснования и разработки комплексных мероприятий по реализации этого варианта энергообеспечения в марте 2014 г. была организована межведомственная рабочая группа Росатома и Спецстроя России. Ее деятельность была направлена, в частности, на разработку проектов по обустройству арктических территорий с применением решений по тепло- и электроснабжению объектов в Арктике на базе атомной энергетики [34].

1.2. Реакторные установки для энергоснабжения удаленных и труднодоступных территорий: проблема выбора

Вопрос использования энергоисточников с реакторами малой мощности для различных целей был поставлен более полувека назад, когда в середине 1950-х гг. были начаты проектные проработки ядерных энергоустановок малой мощности, которые продолжались с различной интенсивностью все последующие десятилетия. Проводившиеся в течение этого времени многочисленные технико-экономические исследования и разработки различных конструктивных разновидностей ядерных реакторов для малой энергетики показали, что реакторы малой мощности и атомные станции на их основе имеют значительный потенциал для освоения новых и перспективных для атомной энергетики сегментов рынка, каким является энергоснабжение отдаленных или изолированных районов. Вместе с тем реакторные установки малой мощности не получили широкомасштабного применения в этом секторе энергопотребления.

Сложности с практической реализацией проектов были обусловлены, в частности, тем, что разработчики РУ исходили из своих соображений (возможностей), не увязывая их с реальными потребностями со стороны энергопотребителей. Налицо было два принципиально противоположных подхода к определению параметров АСММ. Что первично? Параметры РУ или запросы потребителя, который должен стать заказчиком атомной станции [35]? В этом отношении весьма показательна история создания головной плавучей теплоэлектростанции.

В начале 1990-х гг. для реализации демонстрации достоинств ядерных энергоисточников в отдаленных изолированных районах было принято решение о создании атомной электростанции на плавучем средстве (барже). В качестве энергоисточника для такой плавучей станции была выбрана реакторная установка КЛТ-40С [36]. В 1994 г. Правительством РФ было подписано два постановления, относящихся к строительству ПАТЭС с реактором КЛТ-40С в Певеке (Чукотский автономный округ): первый документ отражал вопросы разработки технико-экономического обоснования, а второй — касался проекта строительства и организации работ по выбору площадки. Решение о строительстве ПАТЭС также было закреплено в «Программе развития атомной энергетики в России на период 1998–2005 годов и на перспективу до 2015 года», утвержденной Министерством по атомной энергии (Минатом) в июле 1998 г. Программа предусматривала строительство источников электроэнергии малой мощности на основе ядерного топлива в удаленных регионах Крайнего Севера (Чукотский

автономный округ) и Дальнего Востока (Приморский край). Также высказывались идеи об использовании ПАТЭС для решения энергетических проблем Архангельской обл., а затем и всего Севера (расположив станции по маршруту Северного морского пути). Назывались и конкретные географические точки расположения первых ПАТЭС: Северодвинск (Архангельская обл.), Вилючинск (Камчатка), Дудинка (Красноярский край) и Певек. В 2000 г. ОАО «Северное машиностроительное предприятие» (СМП), Минатомом, ФГУП «Концерн Росэнергоатом» и Правительством Архангельской обл. была подписана декларация о намерениях по строительству головной ПАТЭС. Тогда же Минатомом был выдан заказ ОАО «Малая энергетика» на строительство ПАТЭС. В 2002 г. ОАО «СМП» получило лицензию Госатомнадзора РФ на строительство ПАТЭС [37].

В 2005 г. после долгих оценок и экспертиз коллегия Федерального агентства по атомной энергии окончательно утвердила проект ПАТЭС (технический проект был утвержден в октябре 2002 г.), оснащенной двумя реакторами КЛТ-40С общей электрической мощностью 70 МВт. В декабре 2005 г. в рамках ФГУП «Концерн Росэнергоатом» создана дирекция строящихся ПАТЭС. Закладка ПАТЭС, получившая название «Академик Ломоносов», на ОАО «СМП» произошла 15 апреля 2007 г. Одновременно с этим ФГУП «Концерн Росэнергоатом» подписало с ОАО «СМП» декларацию о намерениях по строительству семи ПАТЭС. Предполагалось, что ПАТЭС будет снабжать электроэнергией и теплом производственные объекты и самого ОАО «СМП», однако предприятие не справилось со строительством первого плавучего атомного энергоблока, вероятно, по причине загруженности работами по государственному оборонному заказу, а также другими гражданскими заказами. Было принято решение о переносе строительства на ОАО «Балтийский завод» в Санкт-Петербурге с одновременной передачей со стороны ОАО «СМП» всего имеющегося задела по ПАТЭС. В августе 2008 г. все договоры с ОАО «СМП» были расторгнуты [37].

Закладка головного плавучего блока на стапеле ОАО «Балтийский завод» состоялась 18 мая 2009 г., а спуск корпуса «Академика Ломоносова» на воду — уже 30 июня 2010 г., на 6 месяцев ранее контрактного срока. К 2011 г. была изготовлена основная часть энергетического оборудования станции.

Как отмечалось ранее, в качестве места размещения головной ПАТЭС первоначально был выбран Певек, имеющий значение для оптимального решения проблемы замещения энергоблоков Билибинской АЭС, вывод из эксплуатации которой должен начаться в 2019 г. Вместе с тем в последующие годы место первоочередной привязки ПАТЭС было изменено дважды. В рамках контракта с ОАО «Балтийский завод» ПАТЭС «Академик Ломоносов» должен был сдан в эксплуатацию в 2013 г. на территории ЗАТО Вилючинск (Камчатский край), где базируется 16-я эскадра подводных лодок Тихоокеанского флота. В июне 2009 г. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору утвердила заключения комиссии государственной экологической экспертизы материалов обоснования лицензии на размещение плавучей атомной теплоэлектростанции малой мощности в ЗАТО Вилючинск на Камчатке, также были утверждены заключения обоснования инвестиций в строительство [37]. Однако после того, как вопрос с размещением плавучей атомной станции был рассмотрен на встрече губернатора Камчатки и министра обороны России С. Шойгу, было принято решение о замене ПАТЭС в Вилючинске на газовую генерацию [38].

Окончательное решение о судьбе «Академика Ломоносова» определило размещение ПАТЭС в Певеке. В апреле 2018 г. ПАТЭС (рис. 1.3), построенная на Балтийском заводе (Санкт-Петербург), была доставлена в Мурманск, где на базе «Атомфлота» в реакторы плавучей станции было загружено ядерное топливо [39].



Рис. 1.3. ПАТЭС «Академик Ломоносов» [40]

АО «Концерн Росэнергоатом» (входит в электроэнергетический дивизион Госкорпорации «Росатом») получило право на эксплуатацию ПАТЭС «Академик Ломоносов» сроком на 10 лет — до 2029 г. Соответствующую лицензию в июне 2019 г. выдала Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору [40]. 19 декабря 2019 г. ПАТЭС выдала первую электроэнергию в изолированную сеть Чаун-Билибинского энергоузла Чукотского автономного округа [41].

Проблемы практической реализации перспективных проектов АСММ, которая является комплексной задачей, связанной с решением научных, инженерно-технических, материально-финансовых, нормативно-правовых и социально-экономических вопросов, неоднократно рассматривались и обсуждались на заседаниях научно-технических советов Госкорпорации «Росатом» и ОАО «Концерн Росэнергоатом», на межотраслевых научно-технических конференциях. Результаты этих обсуждений позволили сформулировать следующие основные факторы, сдерживающие коммерческое внедрение ядерных энергоисточников на локальном и местном уровнях [36, 42]:

- отсутствие прототипных (референтных) энергоблоков, т. е. нет готового продукта;
- отсутствие прямых предложений инвесторов, которые могли бы быть приняты для немедленной реализации;

- при безусловном выполнении требований безопасности факторами для определения приоритета при выборе энергоисточника являются подготовленность к реализации, сроки реализации, готовность промышленности и эксплуатационной инфраструктуры, экономические и коммерческие параметры.

На базе проектных разработок, исследований рынка, определения областей применения, а также исследований по тематическим программам МАГАТЭ и международных проектов, включая INPRO (Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам), сформировался комплекс требований и целевых характеристик АСММ.

Обобщая требования для атомных энергоблоков, которые формулировались различными специалистами с разной степенью детализации [33, 42–46], выделим некоторые из критериев, которым должны удовлетворять атомные энергоисточники при решении задач в рамках государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года»:

- соответствие технических и эксплуатационных параметров энергогенерирующего источника региональным условиям размещения в зонах децентрализованного энергоснабжения (транспорт, эксплуатационные и ремонтные возможности, климат и проч.), включая комбинированное производство электрической и тепловой энергии для обеспечения локальных потребностей;

- гарантированный уровень безопасности и экологичности, который позволяет без неприемлемого риска приблизить АСММ к потребителям энергии, особенно в удаленных и труднодоступных районах;

- экономическая эффективность в специфических условиях применения таких энергоисточников;

- модульный подход в конструкции РУ и технологии сооружения энергоблока, дающий возможность радикально сократить сроки сооружения и создать многоблочные станции путем использования стандартизированных реакторных модулей и укрупненных строительных конструкций заводского изготовления;

- максимальная автономность (автоматизация управления, максимальная длительность топливной кампании и межремонтного периода);

- повышенная устойчивость к внешним воздействиям природного и техногенного характера.

Даже краткий перечень требований к энергоисточникам иллюстрирует комплексный характер задачи внедрения АСММ, которая обуславливает необходимость анализа многих факторов, связанных со строительством и эксплуатацией таких энергоисточников для того или иного конкретного потребителя энергии. Несомненно, одним из определяющих факторов является перспективная нагрузка потенциальных потребителей энергетической продукции. В обобщенном виде перспективные энергетические нагрузки рассмотренных ранее потенциальных потребителей, которые в значительной степени определяют роль и место АСММ при решении проблемы обеспечения энергетической безопасности, приведены в табл. 1.1.

В настоящее время в ряде научно-исследовательских институтов (НИКИЭТ, ФЭИ) и конструкторских бюро («ОКБМ Африкантов», ОКБ «Гидропресс») разработано около 20 реакторных установок малой мощности различных типов и компоновок, которые могут быть использованы для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей в арктических регионах РФ.

Таблица 1.1

Перспективные энергетические нагрузки потребителей энергии
арктической зоны [20, 21, 33, 47–49]

Потребитель энергии	Регион	Нагрузка	
		электрическая, МВт	тепловая, Гкал/ч
Месторождение ниобий-редкоземельных металлов «Томтор»	Республика Саха (Якутия)	до 37	7
Месторождение рудного золота «Кючус»		до 30	10
Месторождение медных руд «Песчанка»	Чукотский АО	более 200	82
Павловское месторождение полиметаллических руд	Новая Земля	30–40	Н. д.
Портовая инфраструктура пос. Тикси	Якутия	12	Н. д.
Инфраструктура арктической группировки ВС РФ	Земли и острова, расположенные в СЛО	0,5–10	Н. д.

Примечание. СЛО — Северный Ледовитый океан.

В табл. 1.2 представлены некоторые сведения о проектах АСММ в стационарном исполнении, по которым имеется информация о параметрах эксплуатации в конденсационном режиме (выработка электрической энергии без тепловых нагрузок) и в режиме когенерации (комбинированное производство электрической и тепловой энергии).

Таблица 1.2

Российские проекты реакторных установок АСММ [43, 50–55]

РУ	Разработчик	Электрическая мощность в конденсационном режиме, МВт	Мощность в базовом режиме когенерации, МВт (э)/Гкал/ч
Проекты АСММ электрической мощностью до 20 МВт			
«УниTERM»	НИКИЭТ	6,6	3,48/9
АБВ-6Э	ОКБМ Африкантов	9	6/12
СВБР-10	Гидропресс	12	6/25
Проекты АСММ электрической мощностью свыше 20 МВт			
КАРАТ-45	НИКИЭТ	60	(45–50)/(50–60)
КАРАТ-100		120	100/120
РИТМ-200	ОКБМ Африкантов	60	32/75
НИКА	НИКИЭТ	100	44/25
СВБР-100	Гидропресс	101,6	77/100

Данные, приведенные в табл. 1.2, позволяют утверждать, что для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей (см. табл. 1.1), могут быть созданы АСММ в широком энергетическом диапазоне:

- АСММ электрической мощностью до 20 МВт, которые целесообразно использовать в качестве автономных энергоисточников для энергоснабжения изолированных потребителей (перспективные месторождения полезных ископаемых в Якутии и на Новой Земле, портовая инфраструктура пос. Тикси и инфраструктура арктической группировки Вооруженных сил РФ);

- АСММ электрической мощностью более 20 МВт — для организации электроснабжения крупных потребителей и/или для работы в энергосистеме (месторождение медных руд «Песчанка» в Чукотском АО).

Широкий спектр реакторных установок, предлагаемых отечественными разработчиками атомных энергоисточников малой мощности, обуславливает необходимость решения проблемы выбора типа АСММ для наиболее эффективного энергоснабжения конкретного потребителя энергетической продукции. Ниже на примере горнопромышленных предприятий, предназначенных для разработки Томторского месторождения ниобий-редкоземельных металлов и месторождения медных руд «Песчанка», приведены некоторые суждения о возможных вариантах использования АСММ различной мощности:

- мощностью до 20 МВт (АБВ-6Э и «УниTERM»);
- мощностью свыше 20 МВт (РИТМ-200 и СВБР-100).

Томторское месторождение

Рассматривая задачу энергообеспечения в районе разработки месторождения Томтор, отметим два фактора, которые, несомненно, имеют значение при выборе источника энергии.

Перспективные нагрузки горнопромышленного предприятия, которое будет разрабатывать это месторождение, характеризуются электрической мощностью до 37 МВт. Кроме того, на основе этого энергоисточника должно быть обеспечено развитие системы теплоснабжения в районе месторождения, прогнозируемая потребность которого составляет 7 Гкал/ч.

Комплексный характер задач, связанных с решением проблемы энергоснабжения, предопределяет теплофикационный режим эксплуатации АСММ, который является наиболее эффективным технологическим процессом, позволяющим значительно повысить КПД энергоисточника и доходную часть от отпуска энергетической продукции, что, несомненно, улучшает технико-экономические показатели АСММ.

Второй фактор, который необходимо учитывать при выборе источника энергии, определяется характером сектора энергоснабжения. Для района Томторского месторождения можно рассматривать два варианта использования АСММ в качестве системообразующего энергоисточника:

- локальный энергоисточник — изолирован от других источников сектора энергоснабжения и обеспечивает энергопотребление в автономном режиме;
- местный энергоисточник — обеспечивает энергоснабжение в сочетании с другими источниками (например, за счет перетоков электроэнергии из региональной энергосистемы).

В варианте использования АСММ в качестве системообразующего локального энергоисточника следует признать целесообразной оптимизацию состава АСММ, которая должна состоять не из одного, а из нескольких энергоблоков, позволяющих обеспечить необходимое резервирование мощности с учетом особенностей и структуры энергопотребления.

Можно полагать, что при использовании АСММ в качестве структурного элемента местной энергосистемы, связанной с другими секторами энергоснабжения, резервирования мощности не потребуется.

С учетом упомянутых факторов и проектных характеристик реакторных установок (см. табл. 1.2) можно сделать вывод о нецелесообразности использования установки РИТМ-200 в качестве системообразующего локального энергоисточника. Это заключение вытекает из требования резервирования мощности в данном секторе энергопотребления, реализация которого в случае с РУ данного типа приведет к переизбытку установленной мощности, а также к неэффективному, как следствие, использованию энергоисточника.

В локальной энергосистеме переизбыток мощности будет проявлен и в случае использования установки СВБР-100, мощность которой превышает потребности в энергетических ресурсах и в конденсационном, и в теплофикационном режиме эксплуатации.

С позиции единичной мощности энергоисточника в локальном секторе энергоснабжения района Томторского месторождения могут быть использованы АСММ, оснащенные реакторными установками АБВ-6Э и «УниTERM».

С учетом проектных характеристик установки АБВ-6Э приблизительно можно оценить, что для покрытия требуемой тепловой нагрузки потребуется одна реакторная установка, работающая в теплофикационном режиме с электрической мощностью примерно 7 МВт. Недостаток электрической мощности (около 30 МВт) потребует три дополнительных энергоблока, работающих в конденсационном режиме на электрической мощности 9 МВт каждый.

В варианте использования РУ «УниTERM» одна установка, работающая в теплофикационном режиме при тепловой нагрузке 7 Гкал/ч, позволяет обеспечить потребление тепловой энергии при электрической мощности около 4 МВт. При этом для покрытия недостатка электрической мощности (примерно 33 МВт) также потребуются пять энергоблоков, работающих в конденсационном режиме с единичной электрической мощностью 6,6 МВт.

Таким образом, на основе упрощенной оценки предварительно можно резюмировать: развитие энергоснабжения для освоения Томторского месторождения на основе локального энергоисточника может потребовать строительства шести энергоблоков с РУ АБВ-6Э или «УниTERM».

При рассмотрении варианта местного энергоисточника можно отметить, что возможность дополнительного энергоснабжения за счет внешних источников электрической энергии определяет утилитарную принадлежность энергоисточника, направленную в основном на покрытие тепловой нагрузки.

Однако и в этом случае, исходя из проектных мощностных параметров установки СВБР-100, также можно считать нецелесообразным использование этой реакторной установки в качестве местного энергоисточника. Более эффективным представляется использование установки РИТМ-200 при снижении максимальной теплофикационной мощности (75 Гкал/ч) до 7 Гкал/ч. Такое снижение тепловой нагрузки будет способствовать повышению электрической мощности в теплофикационном режиме до 48 МВт. При этом небольшой переизбыток мощности может быть использован для передачи в региональную энергосистему. Следует отметить, что такой вариант использования РИТМ-200 не учитывает влияние принципа единичного отказа и доли потребителей первой категории на требуемое число энергоблоков.

Месторождение «Песчанка»

Рассматривая задачу энергообеспечения в районе месторождения «Песчанка», будем исходить из потребностей горнодобывающего комбината и его инфраструктуры на месторождении, которая в зависимости от сценарных условий развития энергетического хозяйства Чаун-Билибинской промышленной зоны Чукотского автономного округа варьируется от 100 до 300 МВт. При этом тепловую энергию в виде низкопотенциального тепла планируется использовать только для отопления и бытовых нужд. Использование высокопотенциального тепла от атомной станции в технологических процессах не предполагается.

Исходя из принятого варианта, направленного на развитие энергетической инфраструктуры промышленной зоны, будем рассматривать использование АСММ в качестве местного энергоисточника, который связан с региональной энергосистемой.

Очевидно, что использование РУ АБВ-6М и «УниTERM» для покрытия рассматриваемых технологических нагрузок не может быть эффективным в силу их малой установленной мощности, которая обуславливает необходимость строительства большого числа энергоблоков.

Наиболее эффективным является использование реакторных установок РИТМ-200 и СВБР-100.

Вариант АСММ с установкой РИТМ-200 наиболее приемлем в сценарных условиях, которые предусматривают строительство энергоисточника с установленной мощностью 100 МВт, необходимой для обеспечения потребностей горнодобывающего предприятия и его инфраструктуры. В общем случае число энергоблоков должно определяться исходя из принципа единичного отказа, с учетом доли потребителей первой категории и коэффициента использования установленной мощности. В условиях отсутствия проектных данных о горнодобывающем предприятии и режимах его эксплуатации приближенно можно оценить, что для покрытия указанной электрической нагрузки потребуется два энергоблока с реакторной установкой этого типа.

Целесообразность и эффективность использования одноблочной АСММ с установкой СВБР-100 в таких же сценарных условиях значительно ограничена, в частности, необходимостью соблюдения принципа единичного отказа, который на практике реализуется путем резервирования. Учет этого фактора обуславливает потребность в создании двухблочной АСММ с передачей избыточной энергопродукции в региональную энергосистему, которая, в частности, может характеризоваться значительно более низкой стоимостью передаваемой электрической энергии.

Наиболее эффективное использование АСММ с реакторными установками СВБР-100 возможно в сценарных условиях развития экономики Чаун-Билибинской промышленной зоны, которые предусматривают наращивание генерирующих мощностей, в том числе с учетом обеспечения электроэнергией в 300 МВт горнопромышленного предприятия на месторождении «Песчанка». В таком варианте покрытие технологической нагрузки предприятия может быть обеспечено АСММ, количество энергоблоков которой с установками СВБР-100 может быть выбрано исходя из принципа единичного отказа и с учетом доли потребителей первой категории и коэффициента использования установленной мощности.

В данных сценарных условиях также возможно эффективное использование АСММ с реакторной установкой РИТМ-200. Однако ограниченная установленная мощность установки определяет необходимость строительства АСММ, количество энергоблоков которой будет в несколько раз превышать их количество в составе энергоисточника, оснащенного установками СВБР-100.

Не рассматривая детально технико-экономические параметры каждого из рассмотренных вариантов в данных сценарных условиях, можем отметить, что одним из преимуществ АСММ с реакторными установками РИТМ-200 является возможность поэтапного наращивания мощности такой АСММ при относительно меньших капитальных затратах на строительство каждого энергоблока. В этом случае возможно снижение финансовых рисков, связанных с реализацией проекта, что может быть привлекательным как для частных инвесторов из неядерного сектора, так и для некоторых энергетических компаний [45].

Таким образом, для энергообеспечения горнопромышленного предприятия на месторождении «Песчанка» могут быть использованы АСММ, оснащенные реакторными установками РИТМ-200 и СВБР-100. Конкурентоспособность и эффективность использования АСММ с установками разного типа в значительной мере определяется сценарными условиями развития энергетической инфраструктуры Чаун-Билибинской промышленной зоны, которые характеризуются различными масштабами наращивания генерирующих мощностей.

1.3. К вопросу об оценке эффективности использования АСММ для энергоснабжения арктических регионов

Как отмечалось ранее, при определенных условиях АСММ могут быть конкурентоспособными по сравнению с традиционными энергоисточниками, работающими на органическом топливе. Вместе с тем отсутствие опыта коммерческого освоения проектов АСММ и их практического использования в различных секторах энергетики во многом объясняет отсутствие достаточно полной информации о технико-экономических характеристиках предлагаемых проектов атомных энергоисточников малой мощности, которая позволяла бы выполнить детально обоснованную оценку их эффективности.

В настоящей работе рассматривается методический подход, на основе которого в условиях ограниченного информационного обеспечения выполнена экспертная ориентировочная оценка (ранжирование) РУ малой мощности различного типа.

1.3.1. Методика сравнительной оценки и критерии для ранжирования инновационных проектов АСММ

Для ранжирования проектов РУ (АСММ) используется методический подход [56], основанный на сравнительной оценке альтернативных проектов атомных энергоисточников, при которой под эффективностью проекта понимается отношение приоритетов инвестиционной привлекательности альтернативных проектов к приоритетам (весам) инвестиционных рисков с учетом рассматриваемых в работе критериев.

Для решения задачи по ранжированию РУ необходимо, с одной стороны, сравнить уровни привлекательности проектов, с другой — уровни их инвестиционного риска.

В соответствии с используемой методикой оценка приоритетности проектов РУ выполняется для двух вариантов возможного критерия. Во-первых, как отмечалось ранее, в качестве меры эффективности используется отношение приоритетов инвестиционной привлекательности к приоритетам риска. Согласно второму варианту, показатель инвестиционной привлекательности определяется с учетом коэффициента оптимизма α [56]:

$$K^* = \{\max [(k_1), (1 - k_2)]\}^\alpha \cdot \{\min [(k_1), (1 - k_2)]\}^{1-\alpha}, \quad (1.1)$$

где K^* — показатель инвестиционной привлекательности проекта с учетом риска; k_1 — уровень инвестиционной привлекательности в долях единицы; k_2 — уровень инвестиционного риска в долях единицы; α — коэффициент оптимизма.

Говоря о коэффициенте оптимизма α , который используется в сравнительной оценке эффективности проектов АСММ, следует отметить, что этот критерий был предложен американским экономистом, лауреатом Нобелевской премии по экономике Л. Гурвицем. Критерий Гурвица позволяет принимать решения в промежуточных случаях между крайним оптимизмом и крайним пессимизмом. В соответствии с этим критерием коэффициент оптимизма α ($0 \leq \alpha \leq 1$) может рассматриваться как степень уверенности при принятии решения в том, что события будут развиваться по наилучшему сценарию. Тогда $(1 - \alpha)$ — коэффициент пессимизма, степень уверенности в том, что события будут развиваться по наихудшему сценарию [57].

Принятый в оценках диапазон значений коэффициента оптимизма (0,3–0,7) можно охарактеризовать следующим образом:

0,3 — в большей степени отражает пессимистический взгляд на развитие событий;

0,5 — характеризует компромиссный взгляд на развитие событий;

0,7 — в большей степени предполагает развитие событий по наилучшему сценарию.

При сравнении уровней инвестиционной привлекательности проектов РУ (k_1 в формуле (1.1)) предполагается, во-первых, провести ранжирование факторов инвестиционной привлекательности с целью выделения наиболее приоритетных, во-вторых, выполнить оценку значимости факторов привлекательности и формирования суждений о предпочтении проектов РУ по каждому из них.

Несомненно, обеспечение гарантированного уровня ядерной и радиационной безопасности является определяющим требованием к атомному энергоисточнику. Данное требование приобретает особое значение в контексте использования АСММ в арктических регионах с возможностью размещения атомных энергоисточников вблизи от потребителей энергетической продукции. С этой точки зрения РУ малой мощности обладают потенциалом для существенного улучшения в области 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 выделим следующие [45, 58]:

- 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.

Не затрагивая различия в проектных решениях, направленных на повышение безопасности в отечественных инновационных разработках АСММ, остановимся на факторах, которые рассматриваются в сравнительной оценке и ранжировании инновационных проектов АСММ.

Инновационный фактор — характеризуется такими критериями, как уровень референтности и стадия разработки.

Уровень референтности (наличие прототипа или прототипных технологий топлива, теплоносителя, режимов работы оборудования) в значительной мере определяет готовность АСММ к коммерческому внедрению в различных секторах малой энергетики. Референтность, которая обусловлена наличием работающих реакторов-прототипов и прототипных технологий, с одной стороны, характеризует надежность предлагаемых технологических решений на всех стадиях жизненного цикла АСММ, с другой — возможность реализации инновационных разработок в кратчайшие сроки и отработки применяемых технологий для последующих поколений АСММ.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние референтности реакторных установок, на рис. 1.4 приведены результаты ориентировочной оценки [43] укрупненных планов-графиков создания АСММ. Как видно из рис. 1.4, необходимость проведения дополнительных НИОКР, в том числе по топливу, обуславливает увеличение сроков реализации инновационных проектов по сравнению с АСММ на базе референтных установок.

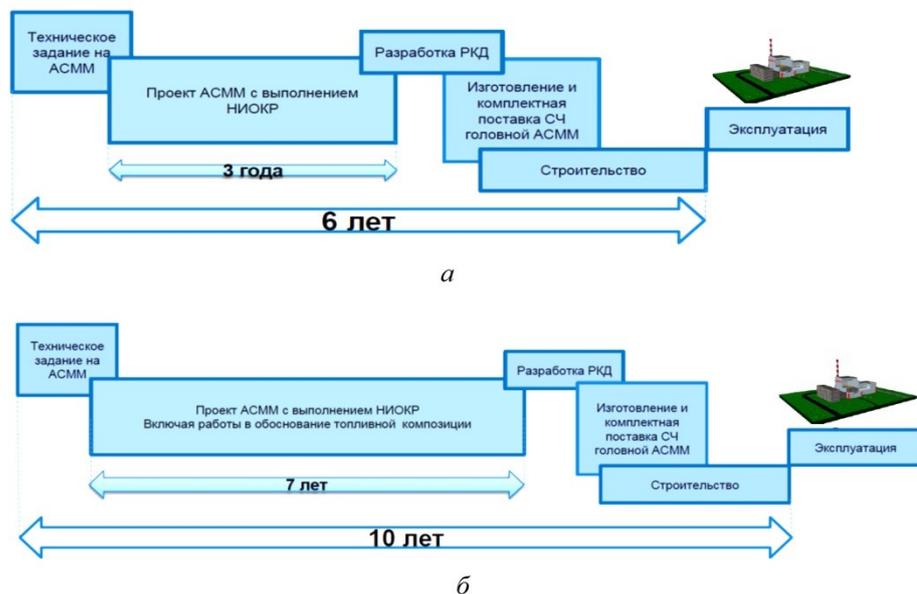


Рис. 1.4. Укрупненные планы-графики создания АСММ на базе референтной реакторной установки (а) и инновационного проекта (б) [43]

В совокупности референтные преимущества, несомненно, повышают привлекательность инновационных разработок для потенциальных инвесторов и заказчиков.

Как отмечалось ранее, проводившиеся в течение длительного времени многочисленные разработки реакторных установок для малой энергетики так и не были реализованы в этом секторе энергопотребления. Понимая заинтересованность потенциальных потребителей-заказчиков не в самой реакторной установке, а, прежде всего, в проекте атомной станции, в последние годы разработчики выполнили проработки объемно-планировочных и компоновочных решений энергоблоков АСММ в стационарном исполнении [51–54, 59–61]. Можно полагать, что стадия разработки, наряду с референтностью, является одним из основных факторов, определяющих степень готовности проектов АСММ к практической реализации.

Потребительский фактор — характеризуется экономической эффективностью, возможностью работы в режиме когенерации и сроком службы основного оборудования.

Экономическая эффективность, как и два предыдущих критерия, несомненно, имеет особое значение при оценке конкурентоспособности атомных энергоисточников по сравнению с другими источниками энергии. С другой стороны, наличие целого ряда предложений по проектным разработкам реакторных установок объективно обуславливает конкуренцию и между АСММ различного типа.

Выбор проекта из альтернативных вариантов, как правило, требует оценки многообразных факторов, оказывающих влияние на эффективность реализации проектов. Значительная неопределенность в исходной информации затрудняет или практически исключает возможность применить стандартные методики, которые основаны на расчете критериев денежной природы (ожидаемая доходность, ожидаемые затраты, чистый дисконтированный доход, срок окупаемости и др.) и успешно используются в условиях определенности информации [56].

Также следует отметить существенные изменения в оценках экономических показателей проектов р. Можно полагать, что такие изменения в значительной степени обусловлены тем, что оценки экономических показателей выполнялись на разных стадиях разработки (степени «зрелости») проектов АСММ в условиях сильной неопределенности.

Среди основных причин ее возникновения в инвестиционных проектах выделим [62]:

- ошибки в расчетах параметров проекта, вызванные неточной экстраполяцией данных на будущее;
- неточность и неполнота информации о параметрах объектов (технических, технологических и экономических);
- возможное изменение рыночной конъюнктуры;
- нестабильность экономической ситуации, экономического законодательства, условий инвестирования.

Многообразие понятийного аппарата, который используется в различных публикациях, посвященных конкуренции и конкурентоспособности, позволяет говорить о неоднозначности категории «конкурентоспособность предприятия»

в современных экономических условиях [63, 64]. Под конкурентоспособностью АСММ в настоящей работе будем понимать способность энергогенерирующего предприятия прибыльно производить и реализовать энергетическую продукцию, которая по своим качественным и стоимостным параметрам наиболее выгодна для потребителя в соответствии с его потребностями. В качестве экономической составляющей инвестиционной привлекательности рассматривается нормированная на срок жизни станции стоимость единицы электроэнергии LCOE (включая все возможные затраты, доходы и инвестиции, в том числе с учетом фактора дисконтирования).

В такой постановке представляет интерес анализ чувствительности себестоимости вырабатываемой энергии к изменению исходных характеристик АСММ с типовыми технико-экономическими показателями (эксплуатационные расходы, КВ и др.). В этом анализе (его результаты приведены в работе [65]) чувствительность определялась коэффициентом эластичности, который равен отношению $\Delta x/\Delta y$, где Δx — относительное изменение показателя эффективности проекта (себестоимости вырабатываемой энергии); Δy — относительное изменение характеристики проекта. Результаты выполненного анализа приведены на рис. 1.5.

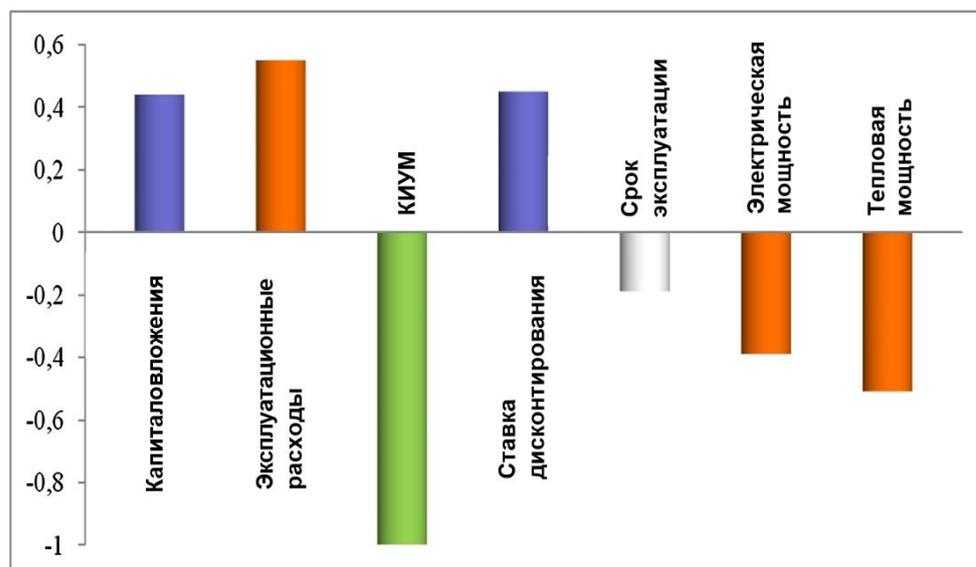


Рис. 1.5. Коэффициенты чувствительности себестоимости энергии, вырабатываемой на АСММ [65]

Как видно из рис. 1.5, наибольшее влияние на себестоимость энергетической продукции оказывает изменение КИУМ атомного энергоисточника. Эта особенность обуславливает целесообразность эксплуатации АСММ в базовых режимах работы, близких к номинальным параметрам. Эффективность такого режима подтверждает целесообразность применения АСММ для энергоснабжения горнопромышленных предприятий, эксплуатация которых характеризуется непрерывным режимом работы с минимальными требованиями к функциям маневрирования энергогенерирующего предприятия.

Известно, что использование атомного энергоисточника наиболее эффективно в режиме когенерации, т.е. при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии. В табл. 1.3 в качестве примера приведены технико-экономические показатели энергоблока с реактором ВК-100, которые наглядно иллюстрируют увеличение доходной части от отпуска энергетической продукции с повышением теплофикационной нагрузки значительно.

Как показали результаты расчетов, приведенные в работе [65], аналогичное в качественном отношении влияние теплофикационного режима на себестоимость вырабатываемой электроэнергии характерно и для АСММ мощностью 12 МВт.

Говоря о режиме эксплуатации АСММ в условиях арктических регионов, следует отметить, что эффективность работы энергоисточника в теплофикационном режиме в значительной степени зависит от структуры энергопотребления конкретного потребителя. Можно полагать, что при незначительной теплофикационной составляющей в энергообеспечении конкретного потребителя капитальные и эксплуатационные затраты на строительство и эксплуатацию тепловых сетей могут нивелировать преимущество режима когенерации. Возможно, что при определенных условиях (например, необходимость строительства достаточно протяженных тепловых сетей, значительные затраты на их эксплуатацию и незначительное переменное потребление тепловой энергии) для покрытия тепловой нагрузки более эффективным будет использование электроэнергии, вырабатываемой автономной АСММ.

Таблица 1.3

Технико-экономические показатели энергоблока с реактором ВК-100 [66]

Режим работы	Электрическая мощность, МВт	Выработка в год		Увеличение доходов по сравнению с конденсационным режимом
		электроэнергии, млн кВт·ч	тепла, тыс. Гкал	
Конденсационный	120	870	–	1,0
С выработкой тепла, Гкал/ч				
80	105	788	416	1,24
120	100	708	624	1,38
150	90	645	780	1,45
200	80	568	1040	1,5

Рассмотренные ранее критерии, которые характеризуют конкурентные предпосылки при выборе приоритетных типов АСММ, в значительной мере определяют соответствие технических и эксплуатационных параметров атомных энергоисточников потребностям потенциальных покупателей энергетической продукции. В этом отношении дополнительным фактором, который связан с ролью и объемом использования АСММ для энергоснабжения конкретных потребителей, является срок службы основного оборудования АСММ.

Если говорить о проблеме энергообеспечения при разработке и освоении месторождений полезных ископаемых, то в первом приближении можно полагать, что данный критерий должен соответствовать срокам обеспеченности

горнодобывающих предприятий запасами извлекаемых полезных ископаемых. Современные оценки промышленных запасов твердых полезных ископаемых на рассматриваемых месторождениях (см. табл. 1.1), на основе которых должны проектироваться и строиться соответствующие горнопромышленные предприятия, позволяют сделать вывод об их обеспеченности запасами полезных ископаемых на срок, превышающий 40 лет. Поэтому указанная характеристика может быть принята в качестве минимального значения рассматриваемого критерия в его количественном выражении.

Производственный фактор характеризуется такими критериями, как длительность топливного цикла, модульный подход в конструкции РУ, численность эксплуатационного персонала.

Влияние КИУМ в сочетании с относительно высокой чувствительностью себестоимости энергетической продукции к эксплуатационным расходам (см. рис. 1.5), связанным с топливной составляющей, обуславливают значимость длительности топливного цикла активной зоны реактора и особенностей обращения с ОЯТ. Данный критерий в значительной степени определяет уровень автономности атомного энергоисточника, которая имеет особую значимость для энергоснабжения потребителей в удаленных и энергоизолированных районах и которая связана с необходимостью резервирования мощности АСММ для энергоснабжения в период остановок реакторов и перегрузки топлива. Уменьшение длительности топливного цикла, характеризующейся, в частности, величиной выгорания топлива, приводит к снижению конкурентоспособности АСММ. Поэтому модификация современных инновационных проектов АСММ, которые базируются на опыте эксплуатации прототипных реакторных установок, направлена в том числе и на увеличение энергозапаса активных зон реакторов АСММ [46, 67, 68].

Очевидно, что длительность топливного цикла реакторов АСММ оказывает влияние и на особенности технологической схемы обращения с ОЯТ. При прочих равных условиях увеличение данного показателя приводит к сокращению остановок реакторов для перегрузки топлива за весь срок службы АСММ и, как следствие, к повышению КИУМ. При этом уменьшаются объем операций по обращению с облученным топливом и общее количество ОЯТ, что также способствует снижению себестоимости энергетической продукции вследствие уменьшения эксплуатационных затрат.

Более эффективной реализации установленной мощности может способствовать многоблочное исполнение АСММ на основе модульно-блочной структуры станции. Можно полагать, что при таком варианте возможно наиболее эффективное использование установленной мощности отдельных энергоблоков в случае особых требований к маневренным характеристикам энергоисточника в соответствии с потребностями заказчика.

Инновационные проекты АСММ для освоения арктических месторождений в подавляющем большинстве базируются на многолетнем опыте проектирования и эксплуатации судовых РУ, сформировавшем особый облик реакторной установки, характерными чертами которой стали: предельная компактность, необходимая для ее размещения в ограниченном объеме реакторного отсека; повышенная ее надежность и живучесть [69]. Указанные

особенности судовых реакторных установок получили свое развитие в инновационных проектах, которые предусматривают модульный подход в конструкции реакторной установки и технологии сооружения энергоблока на основе использования интегральной компоновки оборудования первого контура. Такой подход направлен на создание модульно-блочной структуры АСММ путем использования стандартизированных реакторных модулей заводского изготовления.

Несомненно, модульно-блочное исполнение АСММ позволяет реализовать поставку основного оборудования на площадку станции в виде укрупненных блоков высокой заводской готовности, что, в свою очередь, позволяет значительно уменьшить объемы трудоемких строительно-монтажных работ и сократить сроки строительства энергоисточника.

Модульно-блочное исполнение АСММ с применением энергетических модулей малой мощности позволяет варьировать суммарную мощность многоблочной АСММ кратно единичной мощности реакторных установок в зависимости от установленных требований потребителя. При этом строительство каждого энергоблока потребует относительно небольших капитальных затрат с меньшими инвестициями в каждый последующий блок. Такой подход позволяет снизить связанные с проектом финансовые риски и может способствовать привлечению инвестиционных ресурсов [8, 45, 70, 71].

Снижению финансовых рисков при многомодульной конфигурации АСММ может также способствовать серийное производство реакторных установок. Для любого из рассматриваемых инновационных проектов АСММ первый ее энергоблок будет головным, а последующие энергоблоки, которые будут вводиться для наращивания суммарной мощности энергоисточника, будут относиться к серийному производству реакторных установок. Влияние серийного производства реакторных установок на затраты, связанные с изготовлением и монтажом оборудования атомной станции, наглядно иллюстрирует рис. 1.6.

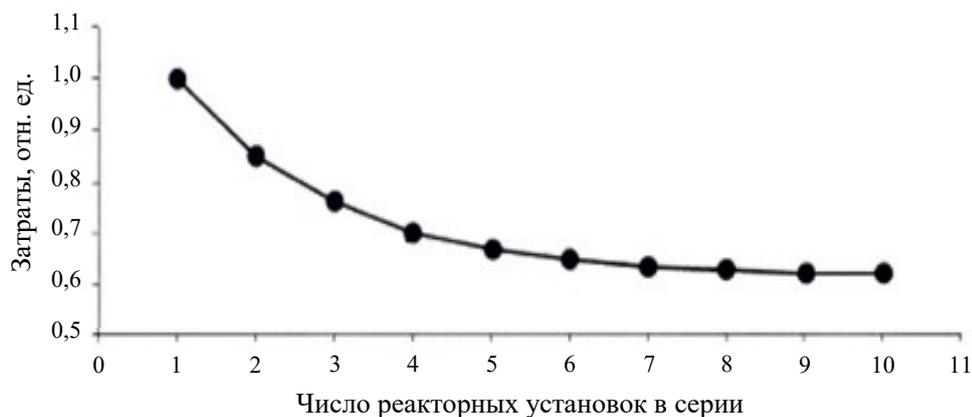


Рис. 1.6. Снижение затрат на изготовление и монтаж оборудования атомной станции в условиях серийного производства реакторных установок [68]

Вместе с тем экономическая эффективность многоблочной АСММ может быть ограничена вследствие устоявшегося формального правила, согласно которому снижение установленной мощности АСММ приводит к повышению

удельных капиталовложений в атомный энергоисточник. Поэтому при определенных условиях строительство большого количества энергоблоков малой мощности на одной площадке может нивелировать преимущества многомодульных АСММ [8].

Указанные преимущества модульных реакторных установок и модульно-блочной структуры АСММ обуславливают рассмотрение такой конкурентной предпосылки, как минимизация логистических проблем, связанных с ограничением массогабаритных характеристик модулей (блоков) АСММ с учетом возможности транспортировки на базе существующей инфраструктуры арктических регионов.

Значительная зависимость себестоимости энергетической продукции от эксплуатационных затрат (см. рис. 1.5) обуславливает целесообразность рассмотрения при ранжировании проектов АСММ такой составляющей, как содержание персонала (эти расходы относятся к условно-постоянным и напрямую связаны с численностью персонала).

Значение данного фактора косвенно иллюстрируют результаты оценки эффективности и конкурентоспособности атомных энергоисточников особо малой электрической мощности (100 кВт) в сравнении с ДЭС аналогичной установленной мощности для автономного энергоснабжения в условиях Крайнего Севера [72]. Выполненные оценки показали, что сокращение численности обслуживающего персонала атомного энергоисточника на 46 % (с 13 до 7 человек) позволяет увеличить на 46 % величину максимальных капитальных затрат, при которых достигается граница коммерческой конкурентоспособности атомного энергоисточника (эквивалентная себестоимость 50 руб/кВт·ч). При этом, например, доля затрат на содержание персонала в структуре эквивалентной себестоимости составляет примерно 37 % при численности обслуживающего персонала 13 человек.

Несомненно, для определения влияния затрат на содержание обслуживающего персонала атомных энергоисточников большей установленной мощности необходима специальная оценка эффективности проектов. В связи с этим можно отметить, что практически во всех работах, посвященных проблеме создания АСММ, возможность сокращения обслуживающего персонала рассматривается либо в качестве требования, либо в качестве ожидаемого эффекта от реализации проектных решений, которые среди прочего предусматривают оптимизацию инфраструктуры, механизацию и автоматизацию работ в процессе строительства и эксплуатации атомных энергоисточников. Так, например, на достижение этой цели направлено создание многоблочной АСММ на основе модульных реакторных установок с внутренне присущими свойствами безопасности, которые могут способствовать сокращению численности эксплуатационного персонала и, следовательно, эксплуатационных затрат за счет перехода к техническому обслуживанию реакторных модулей на сервисной основе. Сокращению численности эксплуатационного персонала также должно способствовать увеличение продолжительности топливного цикла.

В рамках решения поставленной задачи по ранжированию РУ можно полагать, что наиболее целесообразным представляется использование рассматриваемого критерия, который в количественном отношении определяется численностью эксплуатационного персонала, нормированной на единицу

установленной электрической мощности (чел/МВт). Такое количественное выражение критерия позволяет, по нашему мнению, в некоторой степени нивелировать влияние других параметров, которые определяют технико-экономические характеристики атомных энергоисточников различного типа и мощности.

Инфраструктурный фактор характеризует возможности перевозки оборудования РУ различными видами транспорта с учетом массогабаритных параметров единичного оборудования.

Как отмечалось ранее, модульно-блочное исполнение АСММ позволяет реализовать поставку основного оборудования на площадку станции в виде укрупненных блоков высокой заводской готовности, что, в свою очередь, позволяет минимизировать логистические проблемы, связанные с ограничением массогабаритных характеристик модулей (блоков) АСММ с учетом возможности их транспортировки. Размещение потенциальных потребителей энергии на удаленных и труднодоступных территориях, которые характеризуются плохо развитой транспортной инфраструктурой, обуславливает комплексный характер проблемы доставки единичного оборудования реакторных установок на площадку атомного энергоисточника. Решение этой проблемы, несомненно, потребует использования различных видов транспорта — водного, железнодорожного и автомобильного, поэтому знание особенностей каждого вида транспортных средств и возможностей их совместного использования является необходимым условием эффективного планирования сложных транспортных операций [73].

При наличии водных путей перевозку на дальние расстояния эффективно осуществлять водным транспортом, даже при более длительном сроке доставки и сезонности данной услуги. Морские и речные грузоперевозки, как правило, являются частью единого маршрута, который предполагает также применение вспомогательной доставки с использованием железнодорожного и автомобильного транспорта.

В настоящее время нет нормативных, технических и технологических ограничений на перевозку особо тяжелых и негабаритных грузов в арктических регионах России для автомобильного и водного транспорта. Эффективность перевозок в основном будет зависеть от обоснованности логистических решений и технического оснащения.

Правилами дорожного движения не установлены ограничения по массе автомобильного транспортного средства вместе с грузом. Пропуск крупногабаритных и тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам разрешается исходя из несущей способности дорожных покрытий и сооружений и, как правило, ограничивается максимальной нагрузкой на оси автомобиля и качеством дорог.

При перевозке оборудования РУ железнодорожным транспортом главные ограничения связаны с габаритами перевозимого груза. Перевозки крупногабаритного груза ограничиваются только поперечными размерами железнодорожных путей, тоннелей и мостовых сооружений, через которые предстоит следовать грузовому составу.

1.3.2. Экспертная оценка эффективности проектов АСММ

В настоящей работе сравнительная оценка инновационных проектов АСММ выполнена на примере РУ трех типов: АБВ-6, УниTERM и СВБР-10.

При сравнении уровней инвестиционной привлекательности проектов РУ (k_1 в формуле (1.1)) предполагается, во-первых, провести ранжирование факторов инвестиционной привлекательности с целью выделения наиболее приоритетных и, во-вторых, выполнить оценку значимости факторов привлекательности и формирования суждений о предпочтении проектов РУ по каждому из них.

Кратко остановимся на экспертном распределении приоритетов (весов) факторов инвестиционной привлекательности. Отметим, что приведенные далее экспертные суждения носят ориентировочный характер и в значительной мере использованы для иллюстрации применения рассматриваемого методического подхода к сравнительной оценке альтернативных проектов АСММ.

Инновационный фактор. В работе специалистов «ОКБМ Африкантов» [42] — главного конструктора всех судовых реакторных установок для атомного ледокольного флота — отмечается, что уровень референтности и степень готовности реакторных установок к практической реализации является одним из важных факторов, которые сдерживают коммерческое внедрение атомных энергоисточников на локальном и местном уровнях. Значение данного фактора определяет его высокий приоритет (вес), которому устанавливается значение, равное 0,35.

Потребительский фактор. Данный фактор в наибольшей степени отражает требования потенциальных потребителей энергетической продукции. С точки зрения значимости экономической эффективности, роли и объема использования атомного энергоисточника этому фактору устанавливается приоритет, равный приоритету инновационного фактора (0,35).

Производственный фактор. Как отмечалось ранее, данный фактор характеризует уровень автономности и особенности строительства и эксплуатации атомного энергоисточника с точки зрения обращения с ОЯТ и возможности сокращения объема строительно-монтажных работ и оптимизации обслуживания на основе создания модульно-блочной структуры АСММ путем использования стандартизированных реакторных модулей заводского изготовления. В общей структуре факторов инвестиционной привлекательности производственному фактору устанавливается приоритет, равный 0,2.

Инфраструктурный фактор. В определенной степени он связан с производственным фактором и выбор способов доставки оборудования на площадку АСММ будет определяться в зависимости от массогабаритных параметров транспортируемых грузов с учетом состояния и перспектив развития транспортной инфраструктуры в районе размещения атомного энергоисточника. В сравнительной оценке проектов АСММ инфраструктурному фактору установлен приоритет, равный 0,1.

На примере рассматриваемых типов реакторной установки приведем суждения о распределении приоритетов различных проектов по критериям инвестиционной привлекательности.

Инновационный фактор. При распределении приоритетов проектов РУ по данному фактору будем учитывать мнение специалистов [43, 60, 61], согласно которому в рассматриваемой группе энергоисточников наибольшей степенью

референтности технических решений и готовности к реализации характеризуется проект реакторной установки АБВ-6, для которой устанавливается приоритет, равный 0,45. Среди других РУ данной группы более высоким уровнем референтности, основанной на опыте создания и эксплуатации РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем АПЛ пр. 705К и наземных стендов-прототипов, характеризуется СВБР-10. Вместе с тем установка «УниTERM» характеризуется более высокой степенью готовности [36]. С учетом указанных характеристик обеим установкам (СВБР-10 и «УниTERM») устанавливается одинаковый приоритет, равный 0,275.

Потребительский фактор. Во всех проектах РУ предусмотрена возможность работы энергоисточника в режиме когенерации. Следовательно, всем установкам по данному критерию устанавливается одинаковый приоритет (вес) $k_{\text{ког}}$, равный 0,333.

Срок службы основного оборудования РУ всех типов составляет 60 лет, и, следовательно, для всех установок также устанавливается одинаковый приоритет (вес) $k_{\text{сс}}$, равный 0,333.

Говоря о таком показателе экономической эффективности, как себестоимость вырабатываемой электроэнергии, следует отметить существенные изменения в оценках экономических показателей, которые выполнялись в различное время на разных стадиях разработки проектов РУ. Поэтому в качестве данных по стоимости энергетической продукции различных проектов были использованы результаты оценок, которые выполнялись в периоды времени, наиболее близкие из имеющейся опубликованной информации (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Экономические показатели АСММ с единичной мощностью энергоблока в диапазоне 6–12 МВт [43, 74, 75]

АСММ	Электрическая мощность, МВт	LCOE*, руб/кВт·ч	Удельные капиталовложения*, тыс. руб/кВт
АБВ-6	9	1,02 (2007)	118,977 (2007)
«УниTERM»	6,6	2,50 (2007)	98,540 (2007)
СВБР-10	12	1,36 (2005)	140,575 (2005)

* Время оценки, год.

Полагается, что чем меньше стоимость энергетической продукции, тем более привлекательным является проект АСММ. С учетом этого качественного суждения значение долей инвестиционной привлекательности $k_{\text{стоим}}$ различных проектов определялось пропорционально соотношению обратных величин LCOE: АБВ-6 — 0,463; «УниTERM» — 0,189; СВБР-10 — 0,348.

Относительное распределение приоритетов проектов реакторных установок по потребительскому фактору определялось пропорционально сумме приоритетов рассматриваемых критериев ($k_{\text{ког}} + k_{\text{сс}} + k_{\text{стоим}}$): АБВ-6 — 0,377; «УниTERM» — 0,285; СВБР-10 — 0,338.

Производственный фактор. Распределение приоритетов проектов РУ по данному фактору определяется пропорционально сумме приоритетов следующих критериев: длительность топливного цикла; модульный подход в конструкции РУ; численность эксплуатационного персонала.

Согласно проектным данным, которые заявляются разработчиками РУ, длительность топливного цикла составляет: для АБВ-6 — до 12 лет; для «Унитерма» — 15 лет; для СВБР-10 — 17 лет. В соответствии с этими данными приоритеты проектов устанавливаются пропорционально указанной длительности топливного цикла: АБВ-6 — 0,273; «Унитерм» — 0,341; СВБР-10 — 0,386.

Модульный подход в конструкции используется в проектных решениях всех рассматриваемых типов РУ. Поэтому для всех проектов устанавливается одинаковый приоритет, равный 0,333.

Приоритеты по численности эксплуатационного персонала устанавливаются пропорционально соотношению обратных численных значений этого критерия: АБВ-6 — 0,395 (1,5 чел/МВт); Унитерм» — 0,313 (1,89 чел/МВт); СВБР-10 — 0,292 (2,03 чел/МВт).

Таким образом, относительное распределение приоритетов проектов РУ по производственному фактору, которое определялось пропорционально сумме приоритетов по рассмотренным критериям, составляет: АБВ-6 — 0,334; «Унитерм» — 0,329; СВБР-10 — 0,337.

Инфраструктурный фактор. Распределение приоритетов проектов по данному фактору устанавливается на основе анализа нормативных документов [76–82] и результатов оценки возможности перевозки единичного оборудования АСММ различным видом транспорта — автомобильным, железнодорожным и морским.

Приняты следующие допущения и предположения:

- при наличии возможных вариантов единичного транспортируемого оборудования РУ принимается вариант с наименьшими ограничениями;
- допускается перевозка оборудования в горизонтальном положении.

В обобщенном виде установленные специальные требования по перевозке единичного оборудования рассматриваемых РУ приведены в табл. 1.5.

Результаты оценки возможности перевозки единичного оборудования РУ позволили сделать следующие выводы:

- транспортировка парогенерирующего блока РУ АБВ-6 возможна всеми видами транспорта без особых требований по сравнению с оборудованием других РУ;
- транспортировка реакторных блоков РУ «Унитерм» и СВБР-10 возможна только автомобильным и морским транспортом. При этом перевозка автомобильным транспортом накладывает дополнительное требование по разборке или поднятию мостовых пролетов.

При распределении приоритетов проектов принято, что за каждый вид транспорта, который может быть использован для перевозки оборудования, начисляется 1 балл. Каждое дополнительное специальное требование для каждого вида транспорта по сравнению с другими реакторными установками снижает начисленный балл на 10 %.

Таблица 1.5

Специальные требования по перевозке единичного оборудования РУ различными видами транспорта

Тип РУ	Вес, т (габариты, м)	Специальные требования к транспортным средствам	Другие требования к транспортной инфраструктуре
Автомобильный транспорт			
АБВ-6		Необходима разработка спецпроекта; опознавательные знаки «Крупногабаритный груз»; допустимые осевые нагрузки в зависимости от нормативной осевой нагрузки и числа колес на оси	Необходимы работы по укреплению мостов; строительство обходных путей; строительство площадок отстоя; сопровождение патрульным автомобилем ГИБДД
вариант 1	200 (5×3,6×4,5)		
вариант 2	820 (Ø10,5×8)		Необходимы работы по укреплению мостов, разборке или поднятию мостовых пролетов до высоты 8,5 м; строительство обходных путей и площадок отстоя; сопровождение патрульным автомобилем ГИБДД
«Унитерм»		Необходима разработка спецпроекта; опознавательные знаки «Крупногабаритный груз»; допустимые осевые нагрузки в зависимости от нормативной осевой нагрузки и числа колес на оси	Необходимы работы по укреплению мостов или строительству обходных путей и площадок отстоя; разборка/поднятие мостовых пролетов до высоты 5,5 м; сопровождение патрульным автомобилем ГИБДД
вариант 1	170-180 (Ø5,05×10,3)		
вариант 2	500 (Ø6,6×18,4)		Проведение обследования маршрута; работы по укреплению мостов или строительству обходных путей и площадок отстоя; разборка/поднятие мостовых пролетов до высоты 7,0 м; сопровождение патрульным автомобилем ГИБДД
СВБР-10	310 (Ø8×11,05)	Необходима разработка спецпроекта; опознавательные знаки «Крупногабаритный груз»; допустимые осевые нагрузки в зависимости от нормативной осевой нагрузки и числа колес на оси	Необходимы работы по укреплению мостов, строительству обходных путей и площадок отстоя; работы по разборке/поднятию мостовых пролетов до высоты 8,5 м; сопровождение патрульным автомобилем ГИБДД

Тип РУ	Вес, т (габариты, м)	Специальные требования к транспортным средствам	Другие требования к транспортной инфраструктуре
Железнодорожный транспорт			
АБВ-6		Если допускается горизонтальное размещение оборудования, перевозка возможна в соответствии с РД 15-73-94 «Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом». Перевозка железнодорожным транспортом невозможна из-за превышения массы груза и зоны боковой негабаритности	<p>Конкретные типы транспортных средств выбирают перевозчики с учетом типа грузов после согласования с руководителями РЖД.</p> <p>Доставлять можно только тот груз, для которого утверждены правила проведения погрузочных и разгрузочных работ.</p> <p>Согласовывать техническую документацию на перевозку необходимо с департаментом управления перевозками РЖД.</p> <p>Обязательно выполняют требования по фиксации такого груза, чтобы не допустить его смещение в дороге.</p> <p>Груз при доставке не должен оказывать негативного влияния на окружающую среду и железнодорожные пути</p>
вариант 1	200 (5×3,6×4,5)		
вариант 2	820 (Ø10,5×8)		
«УниTERM»		Перевозка железнодорожным транспортом невозможна из-за превышения массы груза и/или зоны боковой негабаритности	
вариант 1	170-180 (Ø5,05×10,3)		
вариант 2	500 (Ø6,6×18,4)		
СВБР-10	310 (Ø8×11,05)	Перевозка железнодорожным транспортом невозможна из-за превышения зоны боковой негабаритности	
Морской транспорт			
АБВ-6		Перевозка осуществляется в соответствии с РД 31.11.21.24-96 «Правила безопасности морской перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов»	<p>Перевозка груза осуществляется в соответствии с проектом, который должен включать: схемы и расчеты по размещению и креплению груза на судне; расчеты балластировки, остойчивости судна; технологию и организацию погрузки и выгрузки груза; мероприятия по подготовке причалов в портах погрузки-выгрузки (при необходимости)</p>
вариант 1	200 (5×3,6×4,5)		
вариант 2	820 (Ø10,5×8)		
«УниTERM»			
вариант 1	170-180 (Ø5,05×10,3)		
вариант 2	500 (Ø6,6×18,4)		
СВБР-10	310 (Ø8×11,05)		

Таким образом, количество баллов, пропорционально которым устанавливаются приоритеты проектов РУ, в целом по инфраструктурному фактору составляет:

- АБВ-6 — 3,0 (без дополнительных специальных требований);
- «УниTERM» — 1,9 (невозможность перевозить железнодорожным транспортом и дополнительные специальные требования при перевозке автомобильным транспортом);
- СВБР-10 — 1,9 (невозможность перевозить железнодорожным транспортом и дополнительные специальные требования при перевозке автомобильным транспортом).

В соответствии с этими параметрами находится относительное распределение приоритетов по инфраструктурному фактору: для АБВ-6 — 0,442; для РУ «УниTERM» — 0,279; для СВБР-10 — 0,279.

В обобщенном виде распределение приоритетов проектов РУ по критериям инвестиционной привлекательности на основе рассмотренных суждений приведено в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Распределение приоритетов проектов РУ по критериям инвестиционной привлекательности (ИИ)

Фактор ИИ	Вес	Приоритеты проекта		
		АБВ-6	«УниTERM»	СВБР-10
Инновационный	0,35	0,450	0,275	0,275
Потребительский	0,35	0,377	0,285	0,338
Производственный	0,20	0,334	0,329	0,337
Инфраструктурный	0,10	0,442	0,279	0,279
Интегральная оценка приоритетов с учетом веса каждого фактора		0,401	0,290	0,309

Сравнительная оценка уровней (приоритетов) инвестиционного риска проектов РУ (k_2 в формуле (1.1)) выполняется на основе данных об удельных капиталовложениях (табл. 1.4), пропорционально которым определяется долевое значение этого критерия для РУ различного типа. В соответствии с данными табл. 1.4 значения уровней инвестиционного риска составляют: для АБВ-6 — 0,332; для РУ «УниTERM» — 0,275; для СВБР-10 — 0,393.

Результаты расчета отношения приоритетов инвестиционной привлекательности и риска, а также показателя инвестиционной привлекательности проектов РУ для рассмотренного диапазона значений коэффициента оптимизма приведены в табл. 1.7. Из нее видно, что оба критерия отдают предпочтение проекту АБВ-6, для которого и отношение приоритетов инвестиционной привлекательности и риска, и значения показателя инвестиционной привлекательности для всех трех значений коэффициента оптимизма наибольшие.

Сравнительная оценка проектов «УниTERM» и СВБР-10 показывает, что при более высокой инвестиционной привлекательности проект СВБР-10

характеризуется наибольшим инвестиционным риском. По критерию отношения приоритетов инвестиционной привлекательности и риска, а также по значениям показателя инвестиционной привлекательности с учетом коэффициента оптимизма более предпочтительным является проект «УниTERM».

Таблица 1.7

Расчет интегрального показателя инвестиционной привлекательности проектов реакторных установок

Приоритет	Приоритеты проектов		
	АБВ-6	«УниTERM»	СВБР-10
Инвестиционная привлекательность, k_1	0,401	0,290	0,309
Инвестиционный риск, k_2	0,332	0,275	0,393
Отношение приоритетов, k_1/k_2	1,208	1,055	0,786
Показатель инвестиционной привлекательности K^* при коэффициенте оптимизма:			
$\alpha = 0,3$	0,467	0,381	0,378
$\alpha = 0,5$	0,518	0,459	0,433
$\alpha = 0,7$	0,573	0,551	0,496

Таким образом, результаты сравнительной оценки эффективности рассмотренных проектов АСММ подтверждают, что формализация процесса принятия решения инвестором носит не директивное, а вспомогательное значение. Различные алгоритмы и процедуры позволяют подготовить информацию в наглядной форме, но окончательное решение о принятии того или иного инвестиционного проекта остается за инвестором.

В целом, говоря о результатах оценки ограниченного числа критериев на основе упрощенного подхода и ряда предположений, необходимо отметить, что выполненное ранжирование реакторных установок в значительной степени носит ориентировочный и предварительный характер. Несомненно, оптимальный подбор группы квалифицированных экспертов и расширение спектра рассматриваемых факторов будут способствовать более обоснованному формированию суждений о предпочтении инвестиционных проектов. Наиболее корректная оценка при выборе того или иного типа реакторной установки должна базироваться на многопрофильном анализе разнообразных факторов, которые в совокупности определяют наиболее эффективное использование АСММ для энергоснабжения конкретных потребителей энергии.

В оценке широкого спектра различных критериев, в частности, можно выделить анализ следующих факторов, которые определяют эффективность, целесообразность и инженерно-техническую возможность использования АСММ:

- анализ вариантов энергообеспечения потенциальных потребителей как с точки зрения конкурентоспособности АСММ различного типа, так и в сравнении атомных энергоисточников с альтернативными источниками энергии;

- оценка пригодности площадок для размещения атомных энергоисточников;
- анализ состояния энергетической и транспортной инфраструктуры и ее развития для обеспечения строительства и эксплуатации АСММ.

Выводы по главе 1

Анализ состояния и перспектив развития энергетической инфраструктуры арктических регионов России показывает, что проблемы энергоснабжения в труднодоступных и удаленных районах обуславливают объективную необходимость развития локальной энергетики на основе использования автономных источников энергии с целью повышения эффективности топливно-энергетического комплекса при безусловном обеспечении энергетической безопасности. В качестве альтернативы традиционным энергоисточникам, работающим на углеводородном топливе, рассматриваются атомные станции малой мощности. Величина перспективных нагрузок потенциальных потребителей энергетической продукции и условия конкурентоспособности атомных энергоисточников позволяют определить области возможного применения АСММ на удаленных и труднодоступных территориях арктических регионов России: энергоснабжение при освоении месторождений твердых полезных ископаемых в Якутии, на Чукотке и архипелаге Новая Земля; энергообеспечение объектов портовой инфраструктуры поселка Тикси и инфраструктуры арктической группировки Вооруженных сил РФ.

На сегодня в России сформирован широкий спектр проектов реакторных установок малой мощности, на основе которых могут быть созданы АСММ для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей в широком энергетическом диапазоне. Для экспертной сравнительной оценки альтернативных проектов АСММ в настоящей работе рассмотрен методический подход, который основан на анализе приоритетов инвестиционной привлекательности и инвестиционных рисков альтернативных проектов с учетом ограниченного числа факторов. С помощью этого экспертно-аналитического метода на примере реакторных установок трех типов (АБВ-6, «УниTERM», СВБР-10) выполнено предварительное ранжирование атомных энергоисточников, которое в количественном выражении отражает их относительное различие и приоритетность для энергоснабжения арктических регионов России.

Литература к введению и главе 1

1. Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики : материалы междунар. конф. : в 3 частях. Ч. 1. Обзорные доклады. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 85 с.
2. Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики : материалы междунар. конф. : в 3 частях. Ч. 2. Вопросы строительства и обеспечение безопасности подземных атомных станций. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 274 с.
3. *Мельников, Н. Н.* Подземные атомные станции / Н. Н. Мельников, В. П. Конухин, В. А. Наумов. Апатиты : КНЦ АН СССР, 1991. 138 с.
4. Проектирование и строительство подземных атомных станций. Обзорная информация / В. М. Мостков [и др.]. Москва : Информэнерго, 1985. 68 с.

5. *Lindbo, T.* Nuclear power plants underground / T. Lindbo, R. S. Oberth // *Subsurface Space: Environmental Protection Low Cost Storage Energy Savings*. 1981. Vol. 2. P. 515–526.
6. *Зверев, А. Б.* Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземных атомных электростанций / А. Б. Зверев // *Атомная энергия*. 1988. Т. 64, вып. 4. С. 150–163.
7. *Саркисов, А. А.* Вступительная статья председателя Программного комитета конференции // *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики*. Т. 2 / А. А. Саркисов ; под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 7–9.
8. *Мелькин, В. С.* Разработка модульных реакторов малой мощности — вопросы безопасности, перспективы и препятствия на пути их развертывания / В. С. Мелькин, В. В. Ужанова // *Атомная техника за рубежом*. 2016. № 2. С. 16–23.
9. Design safety considerations for water cooled small modular reactors incorporating lessons learned from the Fukushima Daiichi accident. IAEA-TECDOC-1785. Vienna : IAEA, 2016. 154 p.
10. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. OECD-NEA, 2016. 73 p. URL: <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf> (accessed: 15.12.2018).
11. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года : утв. Президентом РФ 8 февраля 2013 г. № Пр-232. Текст : электронный. URL: <http://government.ru/news/432/> (дата обращения: 15.01.2015).
12. Освоение минерально-сырьевых ресурсов Севера: варианты энергоснабжения / И. Ю. Иванова [и др.] // *Регион: экономика и социология*. 2011. № 4. С. 187–199.
13. *Смоленцев, Д. О.* Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации / Д. О. Смоленцев // *Арктика: экология и экономика*. 2012. № 3 (7). С. 22–29.
14. *Старостина, Л. В.* Индикативный анализ топливо- и энергообеспеченности Республики Саха (Якутия) / Л. В. Старостина, В. Р. Киушкина. Текст : электронный. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/39tvn113.pdf> (дата обращения: 17.05.2015).
15. Системный подход к обоснованию необходимости широкомасштабного развития АСММ на принципах «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» / П. Н. Алексеев [и др.] // *Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики* / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Наука, 2011. С. 32–63.
16. *Саркисов, А. А.* Новое направление развития — ядерная энергетика малой мощности / А. А. Саркисов // *Атомная энергия*. 2011. Т. 111, вып. 5. С. 243–245.
17. *Наумов, В. В.* Особенности развития Российской Арктики / В. В. Наумов, И. В. Никулькина. Текст : электронный. URL: <http://sdo.rea.ru/cde/conference/3/file.php?fileId=54> (дата обращения: 25.02.2015).
18. Проект «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года». Текст : электронный. URL: http://narfu.ru/aan/institut_arctic/strategy_AZRF_2010.pdf (дата обращения: 27.04.2015).

19. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: утв. постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 321. Текст : электронный. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091759> (дата обращения: 20.01.2019).
20. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н. И. Воропай [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 59–71.
21. Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на Востоке России / Б. Г. Санеев [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Наука, 2011. С. 88–100.
22. Лукин, А. П. Проект «Павловское». Создание на архипелаге Новая Земля горнодобывающего производственного комплекса по добыче и переработке свинцово-цинковых руд / А. П. Лукин. Текст : электронный. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/aad130851e21bd886f2756c9184c7308.pdf> (дата обращения: 21.04.2016).
23. Самойлов, А. Г. Как нам обустроить Арктику / А. Г. Самойлов. Текст : электронный. URL: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=10984> (дата обращения: 21.03.2016).
24. Атомный лихтеровоз «Севморпуть» вернулся из первого рейса. Текст : электронный. URL: <http://www.rosatom.ru/journalist/news/atomnyu-likhterovoz-sevmorput-vernulsya-iz-pervogo-reysa/> (дата обращения: 25.06.2016).
25. Проект «Ямал СПГ». Инфраструктура проекта. Текст : электронный. URL: http://www.novatek.ru/ru/business/yamal-lng/yamal_infrastructure/ (дата обращения: 19.07.2016).
26. Атомредметзолото построит на Новой Земле комбинат по переработке свинцово-цинковых руд. Текст : электронный. URL: http://www.akm.ru/rus/news/2014/may/29/ns_4837089.htm (дата обращения: 17.06.2015).
27. Различные аспекты применения автономных атомных источников энергообеспечения (безопасность, энергоэффективность, труднодоступные территории) / А. О. Пименов [и др.]. Текст : электронный. URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2017/materials/04_Pimenov_NIKIET.pdf (дата обращения: 20.03.2019).
28. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: утв. Президентом РФ 18 сентября 2008 г. № Пр-1969. Текст : электронный. URL: <http://www.rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovy-dok.html> (дата обращения: 27.01.2015).
29. Иванов, Г. В. Военная безопасность в Арктической зоне Российской Федерации и реализация защиты плавучих атомных теплоэлектростанций на трассе Северного морского пути / Г. В. Иванов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 3. С. 483–489.
30. Спецстрой в Арктике. Текст : электронный. URL: <http://sdelanounas.ru/blogs/61978/> (дата обращения: 21.04.2015).
31. Дмитриев В. В. Перспективные задачи ФГУП «Спецстройконтракт» при Спецстрое России» в программах сооружения и обустройства

- арктических объектов. Текст : электронный. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/a07f5641a23015e330e69b623658f07f.pdf> (дата обращения: 18.02.2015).
32. Спецстрой России. Текст : электронный. URL: http://spetsstroy.ru/upload/iblock/c35/buklet_2014_1_.pdf (дата обращения: 20.05.2015).
 33. *Дмитриев, В. В.* Требования к энергогенерирующим источникам для обеспечения объектов на удаленных арктических территориях / В. В. Дмитриев. Текст : электронный. URL: www.innov-rosatom.ru/files/download/file457.html (дата обращения: 15.01.2015).
 34. Состоялось очередное заседание межведомственной рабочей группы Госкорпорации «Росатом» и Спецстроя России по обустройству арктических территорий. Текст : электронный. URL: <http://spetsstroy.ru/press/news/detail.php?ID=10499> (дата обращения: 25.04.2015).
 35. *Кривицкий, И. С.* В роли Золушки пребывает пока в нашей стране малая энергетика / И. С. Кривицкий // Атомная стратегия XXI. 2005. № 2 (16). С. 5–6. Текст : электронный. URL: www.proatom.ru/files/as16_01_08.pdf (дата обращения: 21.07.2018).
 36. *Сидоренко, В. А.* Задачи, проблемы и возможности создания атомных станций малой мощности / В. А. Сидоренко // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Наука, 2011. С. 79–87.
 37. *Фролов, А.* Плавающая АЭС: история и экспортные перспективы проекта / А. Фролов. Текст : электронный. URL: www.ceness-russia.org/data/page_art/p36_1.pdf (дата обращения 04.04.2018).
 38. Губернатор Камчатки: регион нашел замену первой плавучей АЭС. Текст : электронный. URL: www.pronedra.ru/atom/2013/03/28/kamchatka-otkazalas-ot-plavuchej-aes/#axzz2Zlk8qBw7 (дата обращения: 22.07.2013).
 39. Первая в мире плавучая АЭС «Академик Ломоносов» отправилась в большое путешествие. Текст : электронный. URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=3012616> (дата обращения: 20.02.2019).
 40. Плавучий атомный энергоблок «Академик Ломоносов» получил лицензию на эксплуатацию. Текст : электронный. URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/plavuchiy-atomnyu-energoblok-akademik-lomonosov-poluchil-litsenziyu-na-ekspluatatsiyu/> (дата обращения: 30.06.2019).
 41. Плавающая атомная теплоэлектростанция выдала первую электроэнергию в сеть Чукотки. Текст : электронный. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/main-news/33737/> (дата обращения: 26.12.2019).
 42. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности / В. В. Петрунин [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : 2 тома. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 36–49.
 43. *Адамов, Е. О.* Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания / Е. О. Адамов. Текст : электронный. URL: <http://innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf> (дата обращения: 06.10.2018).
 44. *Крушельницкий, В. Н.* Области применения реакторных установок малой мощности / В. Н. Крушельницкий // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : 2 тома. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 50–58.

45. Кузнецов, В. В. Обзор существующих и перспективных атомных станций малой мощности в Российской Федерации и за рубежом / В. В. Кузнецов // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : в 2 томах. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Наука, 2011. С. 159–178.
46. Проекты атомных станций малой и средней мощности, направления их технико-экономической оптимизации / В. В. Петрунин [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : в 2 томах. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Наука, 2011. С. 182–186.
47. Иванова, И. Ю. Приоритеты развития локальной энергетики арктической зоны на востоке РФ / И. Ю. Иванова, Т. Ф. Тугузова, А. К. Ижбулдин. Текст : электронный. URL: <http://sci.irk.ru/energy21/papers/Иванова%20ИЮ%20и%20др%20%20Приоритеты%20развития%20локальной%20энергетики%20арктической%20зоны.pdf> (дата обращения: 30.11.2015).
48. Разработка схемы и программы развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2014–2018 гг. Текст : электронный. URL: <http://www.sakha.gov.ru/node/174822> (дата обращения: 17.05.2015).
49. Стратегия социально-экономического развития Чукотского автономного округа до 2030 года. Текст : электронный. URL: http://chuk.dot.ru/power/priority_areas/priorities_for_development/ (дата обращения: 27.04.2015).
50. АБВ-6Э. Атомный энергоисточник малой мощности для объектов арктической зоны. Текст : электронный. URL: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/abv_6e_ru_web.pdf (дата обращения: 11.01.2016).
51. Проекты энергоблоков для АСММ на базе корпусного кипящего реактора типа КАРАТ / И. Б. Лукаевич [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики : материалы Десятой Междунар. науч.-техн. конф. Москва : Концерн Росэнергоатом, 2016. С. 525–527. Текст : электронный. URL: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/MNTK-2016.pdf> (дата обращения: 15.02.2017).
52. Инновационные проекты атомных станций малой мощности для освоения месторождений и энергообеспечения других объектов арктических территорий России. Текст : электронный. URL: http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/4/7Pimenov.pdf (дата обращения: 09.02.2017).
53. Обликовый проект АСММ с РУ РИТМ-200 // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики : сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. Москва : НИКИЭТ, 2018. С. 118–126. Текст : электронный. URL: http://istc-2018.nikiet.ru:8080/apex/www_flow_file_mgr.get_file?p_security_group_id=2087214192187084&p_flow_id=301&p_fname=rus_eng_istc-2018_papers.pdf (дата обращения: 21.02.2018).
54. Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области. Книга 2. Ч. 1. Текст : электронный. URL: http://www.akmeengineering.com/assets/files/OVOS/MOL_soor_kn2-1.pdf (дата обращения: 23.03.2017).
55. Internationalization of the nuclear fuel cycle. Goals, strategies and challenges. Текст : электронный. URL: https://scholar.harvard.edu/files/matthew_bunn/files/bunn_internationalization_of_the_nuclear_fuel_cycle.pdf (дата обращения: 20.07.2018).

56. *Хайрулин, И. Г.* Методологические подходы к сравнительной оценке эффективности инновационных проектов в условиях сильной неопределенности / И. Г. Хайрулин. Текст : электронный. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17942552_49116494.pdf (дата обращения: 17.06.2018).
57. Теория принятия решений. Текст : электронный. URL: <http://www.rea.ru/ru/org/cathedries/mathmek/documents/ТЕОРИЯ%20ПРИНЯТИЯ%20РЕШЕНИЙ.pdf> (дата обращения: 17.10.2018).
58. Проектные и технологические разработки для реакторов малой и средней мощности — перспективы и проблемы внедрения / М. Хадид Субки [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : в 2 томах. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 14–35.
59. Автономная саморегулируемая реакторная установка «УниTERM» с повышенным уровнем безопасности / Е. Н. Гольцов [и др.] // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. Москва : НИКИЭТ, 2016. Т. 1. С. 587–594. Текст : электронный. URL: http://www.nikiet.ru/images/stories/NIKIET/Publications/Conf/mntk_nikiet_2016/ru_doklady_vol_1.pdf (дата обращения: 24.10.2017).
60. *Егоров, С. В.* Потенциал создания энергоисточников на базе АСММ для применения в условиях Арктической зоны / С. В. Егоров. Текст : электронный. URL: http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/4/5Egorov.pdf (дата обращения: 28.10.2017).
61. *Жарков, О. Б.* Атомные станции малой мощности. Принципы и подходы к сооружению наземных АСММ / О. Б. Жарков. Текст : электронный. URL: http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/0PORTAL/AtomStroyStandart_2016/Jarkov_2016_AS.pdf (дата обращения: 24.03.2017).
62. *Уланов, С.* Анализ рисков при управлении инвестиционными проектами / С. Уланов, Ю. Макаров, Д. Опарин. Текст : электронный. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_17908485_82885720.pdf (дата обращения: 17.06.2017).
63. *Мокроносов, А. Г.* Конкуренция и конкурентоспособность : учебное пособие / А. Г. Мокроносов, И. М. Маврина. Екатеринбург : Уральский федер. ун-т, 2014. 194 с. Текст : электронный. URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28814/1/978-5-7996-1098-2_2014.pdf (дата обращения: 24.05.2017).
64. *Плотицина, Т. М.* Определение конкурентоспособности предприятия / Т. М. Плотицина // Вестник ТГТУ. 2010. Т. 16, № 1. С. 205–211. Текст : электронный. URL: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_16/pdf/16_1_022.pdf (дата обращения: 24.05.2017).
65. *Билашенко, В. П.* Анализ пороговых значений технико-экономических характеристик атомных станций малой мощности / В. П. Билашенко, В. Е. Калантаров, Д. О. Смоленцев // Известия РАН. 2014. № 3. С. 89–96.
66. Корпусные кипящие реакторы для атомной теплофикации / А. С. Курский [и др.] // Атомная энергия. 2011. Т. 111, вып. 5. С. 297–303.
67. Опыт и перспективы разработки материалов и твэлов для транспортных реакторов и атомных станций малой мощности / Г. В. Кулаков [и др.] // Атомная энергия. 2015. Т. 119, вып. 5. С. 243–249.
68. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactor: Report of Nuclear Energy Agency. OECD. URL: <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf> (accessed: 16.12.2018).

69. Установки «ОКБМ Африкантов» смогут дать энергию для проектов в Арктике. Текст : электронный. URL: <http://www.okbm.nnov.ru/russian/publications/988--q-q-> (дата обращения: 22.05.2017).
70. Возможности применения АЭС малой мощности для энергоснабжения гражданских потребителей. Текст : электронный. URL: http://nts-ees.ru/sites/default/files/nts_ees_17_poyab.pdf (дата обращения: 22.04.2017).
71. Атомная энергетика: большие надежды на малые реакторы // Энергетический бюллетень. Москва : Аналит. центр при Правительстве РФ, 2016. № 40. 26 с.
72. Будылов, Е. Г. Конкурентоспособность ядерных энергоисточников особо малой мощности в условиях территорий Крайнего Севера России / Е. Г. Будылов, М. М. Тревгода, А. П. Глебов // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики : сборник докладов Десятой Междунар. науч.-техн. конф. Москва : Росэнергоатом, 2016. С. 684–689. Текст : электронный. URL: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/MNTK-2016.pdf> (дата обращения: 15.12.2018).
73. Транспортировка крупногабаритных и тяжеловесных грузов. Текст : электронный. URL: <https://xreferat.com/96/1541-1-transportirovka-kрупnogabaritnyh-i-tyazhelovesnyh-gruzov.html> (дата обращения: 25.10.2017).
74. Атомная станция малой мощности АСММ «Униатерм» для электро- и теплоснабжения. Текст : электронный. URL: <http://atomicexpert-old.com/sites/default/files/library-pdf/Униатерм%20%28НИКИЭТ%29.pdf> (дата обращения: 20.06.2017).
75. Кенжин, Е. А. Реакторные установки малой мощности / Е. А. Кенжин // Ядерная и радиационная физика : материалы 6-й Междунар. конф. : в 3 томах. Т. 1. Алматы : ИЯФ НЯЦ РК, 2008. С. 16–24. Текст : электронный. URL: <http://www.inp.kz/konfrs/arkhiv/shestaya-mezhdunarodnaya-konferenciya-abyadernaya-i-adiacionnaya-fizikabb-icnnp07/tom-1.pdf> (дата обращения: 21.07.2015).
76. Инструкция по перевозке крупногабаритных и тяжеловесных грузов автомобильным транспортом по дорогам Российской Федерации. Текст : электронный. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9028359> (дата обращения: 15.02.2015).
77. Морские перевозки негабаритных грузов. Текст : электронный. URL: <http://goro.pro/morskie-perevozki> (дата обращения: 05.05.2017).
78. О габаритах грузов, перевозимых железнодорожным и автомобильным транспортом. Текст : электронный. URL: <https://exkavator.ru/articles/laws/~id=9762> (дата обращения: 27.04.2017).
79. Основные правила перевозки негабаритных грузов железнодорожным транспортом. Текст : электронный. URL: <http://logoskop.ru/perevozka/negabaritnyh-gruzov-zhd-transportom.html> (дата обращения: 25.04.2017).
80. Перевозка негабаритной техники и оборудования морскими видами транспорта. Текст : электронный. URL: <http://sea-cargo.ru/Pages/oversized%20cargo%20sea.html> (дата обращения: 05.05.2017).
81. Перевозка негабаритных грузов различными видами транспорта. Текст : электронный. URL: <http://rostrans.biz/nash-arkhiv/stati/155-perevozka-negabaritnykh-gruzov-razlichnymi-vidami-transporta> (дата обращения: 03.05.2017).
82. РД 15-73-94. Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом. Текст : электронный. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901765491> (дата обращения: 22.04.2017).

Глава 2

ВЫБОР ПЛОЩАДОК ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АСММ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЯХ С УЧЕТОМ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ, ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Несмотря на имеющиеся и признанные международным сообществом рекомендации относительно выбора площадок для наземных атомных станций, типовая методология сравнения вариантов площадок, как и выбора оптимальных из них, до настоящего времени не разработана.

2.1. Анализ методологий выбора площадок для размещения АСММ в приповерхностных геологических формациях

Методика Республики Беларусь. В соответствии с методологией выбора площадки под строительство АС, разработка которой ведется в Республике Беларусь [1, 2], для сложных технологических производств используют алгоритм выбора площадок, согласно которому проводится последовательная отбраковка площадок по ограничивающим факторам. По результатам такой выборки оставляется несколько конкурентных пунктов размещения АС. Последовательность процесса показана на рис. 2.1.

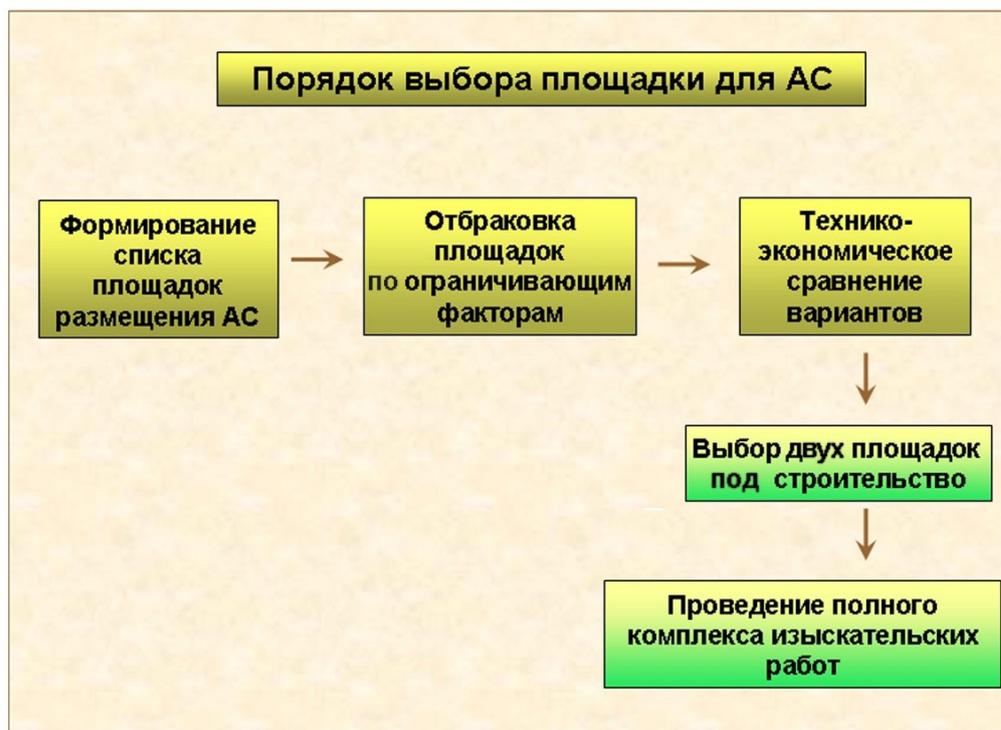


Рис. 2.1. Алгоритм выбора площадок в Республике Беларусь

Далее путем технико-экономического сравнения выбираются наилучшие варианты — основная и резервная площадки, на которых проводится полный комплекс изыскательских и исследовательских работ. При этом площадки, исключенные на предварительном этапе по ограничивающим факторам, больше не рассматриваются.

Оценка площадок во Франции. Во Франции первостепенное значение придается общественному мнению населения, поэтому при выборе площадки для размещения радиационно опасных объектов на стадии исследований согласовывается вопрос с местными жителями прилегающего района. Например, для выбора площадки под геологическое захоронение долгоживущих РАО в 1993 г. было опубликовано предложение населенным пунктам страны разместить у себя объект для захоронения РАО, кроме того, были определены новые стимулы для экономического развития, а также средства контроля выполнения и оценки исследовательских программ. На это предложение откликнулось 30 «добровольцев», из их числа были выбраны три потенциальные площадки для дальнейшего изучения. Порядок выбора площадки под геологическое захоронение РАО показан на рис. 2.2.

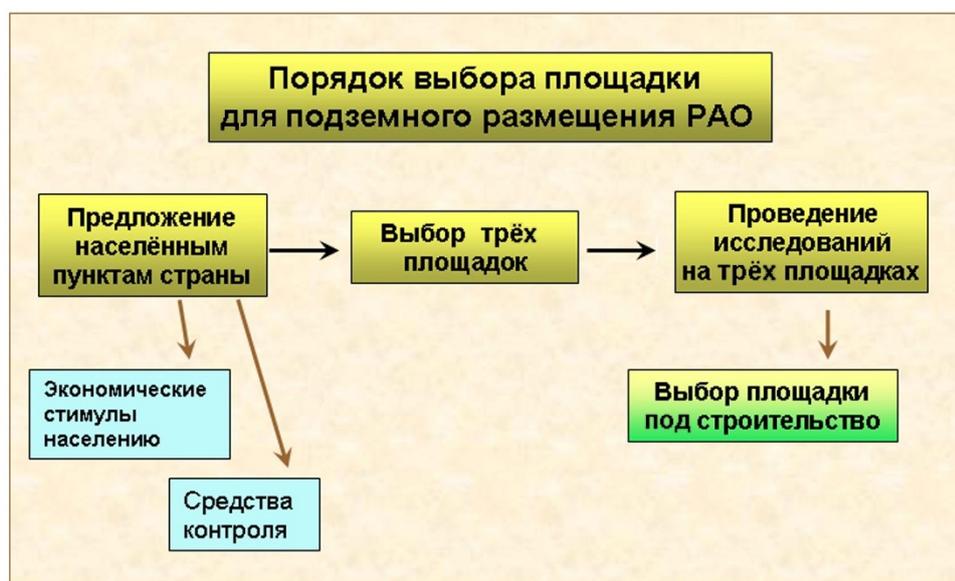


Рис. 2.2. Порядок выбора площадки под геологическое захоронение

После продолжительных исследований, выполненных в 1994–1996 гг., в органы государственного управления были поданы заявки на рассмотрение трех площадок в качестве мест размещения хранилища. В конце 1998 г. правительственной комиссией была утверждена площадка муниципалитета Бюр [3].

Анализ мирового опыта показывает, что существуют различные подходы в области выбора площадок, которые могут кардинально отличаться друг от друга. Одно из направлений сводится к использованию какой-либо известной площадки, например отработанного рудника, и последующей проверке ее пригодности. Второе направление связано с выбором из определенного количества приемлемых площадок и требует последовательного выполнения ряда обязательных процедур:

- определение критериев приемлемости площадок, их исключения или предпочтительности;
- составление перечня потенциальных площадок;
- определение оценочных параметров каждой из площадок как технического, так и социально-экономического характера;
- оценка предварительно выбранных площадок посредством многофакторного анализа и ранжирование площадок;
- утверждение наиболее предпочтительной площадки.

Оба направления эффективны и могут дать хорошие результаты при меньших затратах в первом варианте. При этом возможно использование промежуточного варианта, когда перечень «привлекательных» площадок ограничен, а сравнение площадок проводится по сокращенной программе. Данный алгоритм приемлем как для поверхностного, так и для подземного варианта размещения АС. Однако в зависимости от размещения атомной станции на дневной поверхности или в приповерхностных геологических формациях значимость и вес отдельных параметров, характеризующих площадку, будет различен. При подземном размещении атомных станций основную роль приобретают технические аспекты, а при поверхностном — социальные. Решающим фактором в выборе той или иной площадки будет экологическая безопасность и экономическая приемлемость.

Методика МАГАТЭ. Вниманию государств обращается на тот факт, что нормы безопасности МАГАТЭ не являются юридически обязательными. Они разработаны с целью обеспечения того, чтобы мирное применение атомной энергии и обращение с радиоактивными материалами осуществлялось таким образом, чтобы дать возможность государствам выполнять свои обязательства в соответствии с общепринятыми принципами международного права и правилами, касающимися охраны окружающей среды. Согласно общепринятому принципу, территория государства не должна использоваться таким образом, чтобы причинить ущерб другому государству [4].

В международных руководствах в области размещения опасных объектов МАГАТЭ разработало и опубликовало детальную документацию по размещению атомных электростанций, причем методология выбора площадок и критерии, представленные в этих документах, могут быть использованы при выборе площадок как для поверхностных, так и для подземных АС.

Согласно стандартному подходу МАГАТЭ, структура которого показана на рис. 2.3, выбор площадки осуществляется в три этапа.

Оценка предварительно выбранных площадок производится посредством ранжирования площадок. Методика ранжирования основана на международной и отечественной практике экспертных оценок по многобалльной системе, по результатам которой определяется количество баллов для конкретного критерия. Диапазон изменения баллов при ранжировании площадок колеблется от 1 до 10. Наименьшее количество баллов соответствует самым неблагоприятным условиям. После того как каждый критерий с определенным по значимости весом будет применен к площадке, рассчитывается общий итог ранжирования.

Критерии для ранжирования площадок подразделяются на две основные категории: первая связана с природными условиями, вторая — с социально-экономическими факторами. Первая категория содержит наиболее критичные с точки зрения безопасности показатели отбора при выборе площадки.



Рис. 2.3. Стандартный подход МАГАТЭ при выборе площадки

Критерии, связанные с природными условиями:

- гидрогеологические;
- сейсмические;
- географические и климатологические;
- окружающая среда.

Социально-экономические критерии:

- места заселения человеком;
- экономические показатели.

Распределение по весу обосновано следующими правилами: общий вес, придаваемый «критериям естественных условий» и «социально-экономическим критериям», составляет 50 на 50 %.

«Критерии естественных условий» — двум критериям «наличие подземных вод» и «климатическим изменениям» придается суммарный вес в 10 %, остальные «критерии естественных условий» оцениваются в 10 % каждый.

Среди «социально-экономических критериев», «критерий капитальных затрат» является наиболее важным; вес, придаваемый этому критерию, составляет 20 %. Другим «социально-экономическим критериям» придается вес в 10 %.

Методика Атомэнергопроекти. В нормативном документе СППНАЭ-93 «Основные требования к разработке технико-экономического обоснования строительства атомной станции. Положение о порядке выбора площадки строительства» [5] устанавливается порядок разработки и требования к составу,

объему, содержанию и оформлению проектно-изыскательской документации, необходимой для выбора, согласования и утверждения пункта и площадки строительства атомной станции.

Под площадкой строительства АС понимается территория в пределах охраняемого периметра, на которой размещаются все основные и вспомогательные сооружения АС (площадка АС) и территория за пределами ограды. Пункт размещения АС — территория, на которой могут быть размещены одна или несколько площадок в пределах района.

Документ разработан в соответствии с действующими в Российской Федерации законодательными актами, указами Президента РФ, постановлениями и распоряжениями Правительства РФ, нормативно-техническими документами в области атомной энергетики, строительства, инженерных изысканий, рекомендациями и нормами по безопасности МАГАТЭ для атомных станций, федерального надзора, землепользования, экологии, лицензирования и экспертизы [5].

Основание для выбора пункта размещения и площадки строительства АС. Согласно положению документа [5], выбор пункта размещения площадки строительства АС производится на основании стратегии развития атомной энергетики России, разработанной в рамках Государственной комплексной топливно-энергетической программы Российской Федерации «Энергетическая стратегия России», или специальных постановлений и распоряжений Правительства РФ. Помимо этого учитываются положения ТЭД по выявлению районов размещения атомных источников энергоснабжения и материалов по долгосрочному кадастру размещения новых объектов атомной энергетики на территории Российской Федерации и в соответствии со статьей 28 Земельного кодекса РСФСР, статьей 11 Закона РСФСР «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» и статьями 41–44, 48 Закона РСФСР «Об охране окружающей природной среды». Работы по выбору места расположения атомной станции выполняются в два этапа: первый этап ТЭО — выбор пункта размещения АС; второй этап ТЭО — выбор площадки строительства АС.

Как правило, в каждом пункте размещения АС должно быть намечено *не менее двух площадок*, наиболее перспективные из которых должны служить площадками-представителями при сравнении условий размещения различных пунктов.

Для выбранных конкурентных пунктов определяются: переменные затраты, связанные с подготовкой территории и оснований сооружений АС, дорожным, сетевым, гидротехническим строительством, сносом жилья и строений, компенсацией за водные, земельные и другие ресурсы; затраты на развитие инфраструктуры. Оцениваются ориентировочные сроки строительства, возможная мощность.

Принципиальная схема выбора площадки АС показана на рис. 2.4.

Работы, выполняемые по выбору площадки строительства АС, являются вторым этапом выбора места расположения АС при разработке ТЭО.

Выбор местоположения АС определяется с учетом особенностей природных условий района размещения АС и оценки ее возможного влияния в пределах выбранного и согласованного пункта. Дается описание и сопоставление вариантов площадок с комплексом технико-экономических показателей.

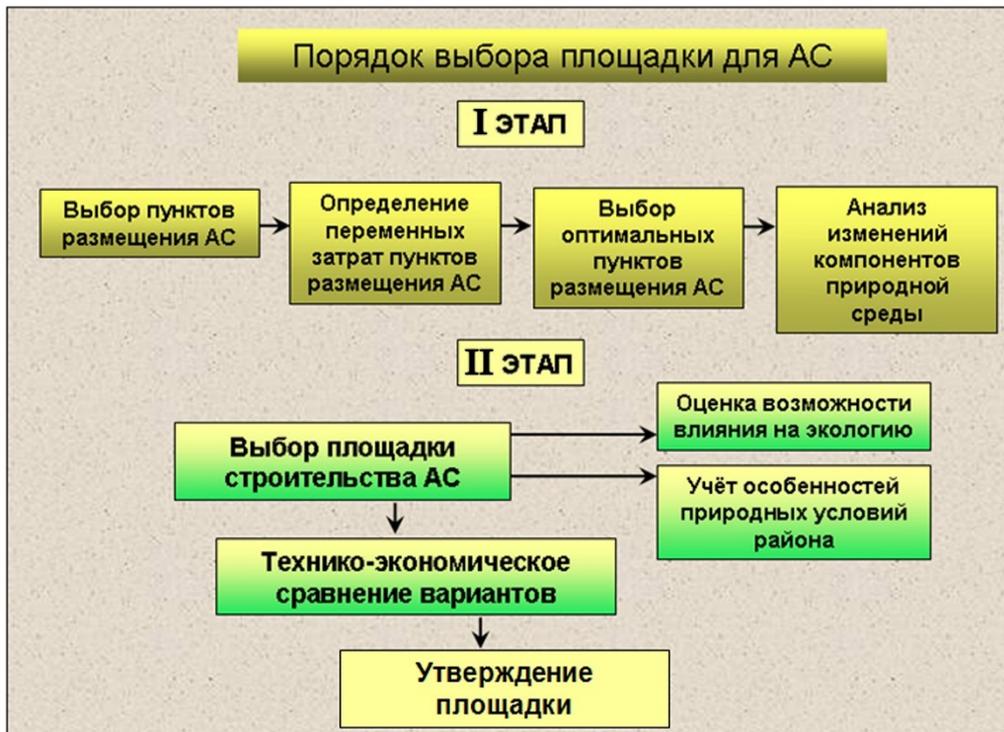


Рис. 2.4. Принципиальная схема выбора площадки АС

Процедура выбора площадки. На основе анализа природно-географических факторов района (геоморфология, распределение на территории залежей полезных ископаемых, положение водных объектов, особенности рельефа), положения заповедных зон, историко-археологических памятников, населенных пунктов, промышленных предприятий, транспортной сети для дальнейшего изучения намечаются пункты расположения АС.

В табличной форме приводится перечень всех намеченных пунктов, включая те, на которых полевые изыскания не проводились. Дается оценка пригодности района по техногенным условиям размещения АС, а также описание источников техногенной опасности, указывают величину воздействий (воздушных ударных волн, колебаний грунта, кинематических параметров летящих тел, коррозионной активности сбросов и токсичности выбросов со стороны промышленных объектов и др.), развития физико-геологических процессов и явлений, сейсмических условий пункта. Дается оценка пригодности обследуемой территории.

При окончательном выборе площадки для строительства АС оценивается все многообразие факторов, включая условия организации строительства, а также затраты на защиту территории размещения АС и самой станции от внешних воздействий природного и техногенного происхождения.

Подробно обосновываются рекомендации по выбору площадки. Рекомендуемой может быть площадка, на которой переменные затраты не являются наименьшими, но основанием для выбора площадки могут

послужить другие факторы (сохранность сельскохозяйственных земель, сокращение подготовительного периода и др.). На этапе окончательного выбора площадки производится технико-экономическое сравнение двух-трех вариантов площадок, где оценивается себестоимость отпускаемой продукции (электроэнергии, тепловой энергии), прибыль, рентабельность и срок окупаемости по вариантам.

Таким образом, анализ различных методологий выбора площадок для подземных и приповерхностных АС позволяет сделать следующие выводы:

- в методологии выбора площадок выявлены несколько основных подходов. В методиках Беларуси и Франции на первом этапе осуществляют отбор нескольких площадок, а затем определяют пригодность выбранных площадок. В методиках МАГАТЭ и Атомэнергопроекта сначала определяют критерии приемлемости и оценочные параметры каждой из площадок, на последнем этапе путем ранжирования технических и социально-экономических критериев осуществляют оценку и выбор площадок;

- в научно-исследовательских работах приемлемо использование промежуточного варианта с ограниченным перечнем потенциальных площадок, отработанных на предыдущих стадиях исследований. Поскольку процедура выбора и сравнение площадок требует установки определенных критериев, такой набор критериев также формируют на начальной стадии выбора площадок;

- установлено, что методики, применяемые в области выбора площадок для особо опасных подземных и наземных объектов на стадии принятия окончательного решения, имеют похожие алгоритмы. В частности, на этой стадии решение принимается по результатам технико-экономического сравнения.

В качестве недостатка методики выбора площадок в Беларуси необходимо отметить исключение возможных перспективных площадок по ограничивающему фактору на первоначальном этапе, в дальнейшем эти площадки уже не рассматриваются.

В качестве положительного момента в методике МАГАТЭ необходимо отметить следующее:

- в алгоритме заложено ранжирование площадок, которое осуществляется на основании критериев, характеризуемых числовыми значениями (практика экспертных оценок), что позволяет получить сравнительную характеристику по многобалльной системе в наглядном виде;

- в расчетах учитывается корректирующий фактор, который связан с качеством и достоверностью информации. Качество и достоверность первичной информации имеет первостепенное значение на всех этапах выбора площадки;

- в процессе ранжирования площадок оценивается показатель «чувствительность», что в целом повышает достоверность полученных данных;

- окончательное решение принимается на основании комплексной оценки ранжирования по общему количеству баллов.

Обращает на себя внимание завышенное значение удельного веса экономических показателей (20 %) при ранжировании, что в целом не всегда является оправданным. Необходимо отметить, что в ряде случаев основанием для выбора площадки могут служить другие факторы, например, ценность или сохранность сельскохозяйственных земель, общественное мнение и др.

Одним из главных положительных аспектов в методике Атомэнергопроекта является тот факт, что оценка вмещающей геологической среды потенциальных площадок рассматривается с точки зрения эффективности как основного защитного барьера среды обитания человека. Для выбранного пункта размещения проводится анализ изменений компонентов природной среды. Это позволяет на первом (предварительном) этапе исключить из рассмотрения те площадки, эксплуатация на которых в дальнейшем может привести к экологическим осложнениям. На втором этапе местоположение станции рассматривается с учетом особенностей природных условий района размещения АС и оценки ее возможного влияния на экологию прилегающего района.

2.2. Критерии оценки площадок

Вопросу разработки критериев выбора площадки для размещения радиационно опасных объектов в нормальных климатических и метеорологических условиях, включая строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации АЭС, посвящено значительное количество работ. Наиболее подробно методология определения критериев выбора площадок в целом для энергетических объектов с использованием элементов системного анализа изложена в работе Р. Кини [6]. В то же время каждое государство, основываясь на рекомендациях МАГАТЭ и используя свои специфические условия, разрабатывает нормативно-правовую и техническую документацию, определяющую критерии, условия, порядок и глубину поисковых исследований, достаточных для выбора площадки для атомных станций.

Необходимо отметить многокритериальность условий выбора площадки, состоящую из большого количества геологических, горнотехнических, экологических, социальных и экономических параметров. При выборе площадки под размещение рассматриваемого энергетического объекта необходимо учитывать воздействие его на окружающую среду, экономические и социальные факторы региона, безопасность населения и общественное мнение.

Оценка воздействия на окружающую среду представляет собой многоступенчатую задачу и включает в себя предварительное изучение состояния окружающей среды (почвы, флоры и фауны) до начала строительства станции и дальнейший мониторинг за состоянием этих компонентов во время ее строительства, в период эксплуатации и снятия с эксплуатации. В качестве основных критериев при выборе площадки для строительства АСММ рассматриваются свойства геологической формации и социально-экономические условия.

Общие положения для определения критериев по выбору площадки под строительство АСММ можно сформулировать следующим образом. В районе размещения и на площадке должны быть проведены проектно-изыскательские и исследовательские работы по оценке условий размещения, в том числе:

- выявление в районе и на площадке процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, а также оценка параметров внешних воздействий на энергетический объект;
- учет экономических, социально и культурно значимых объектов хозяйственной и иной деятельности в районе размещения площадки с оценкой их перспективного развития, в том числе кадастра месторождений полезных ископаемых;

- определение численности населения в районе размещения с учетом его демографического роста и распределения по районам проживания, а также удаленности наиболее населенного пункта от предполагаемого размещения атомной станции в пределах зон планирования защитных мероприятий и обязательной эвакуации населения;

- оценка характеристик окружающей среды, определяющих перенос и накопление радиоактивных веществ, в том числе гидрологических и гидрогеологических условий;

- учет наличия в районе размещения и на площадке: других действующих, сооружаемых и проектируемых объектов использования атомной энергии; зданий, относящихся к категории взрывопожарной и пожарной опасности; объектов, содержащих токсичные и коррозионно-активные вещества, а также транспортных путей, аварии на которых могут оказывать воздействие на АСММ;

- определение путей и условий перевозки ядерных материалов, ядерного топлива, отработавшего ядерного топлива, радиоактивных веществ, радиоактивных отходов и определение маршрутов безопасной эвакуации населения.

Предварительная оценка соответствия площадки требованиям нормативных документов должна обеспечивать:

- безопасность эксплуатации с учетом экстремальных характеристик выявленных процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и их неблагоприятных сочетаний;

- защиту населения и окружающей среды от радиационных воздействий при нормальной эксплуатации и проектных авариях;

- ограничение радиационного воздействия на население и окружающую среду при запроектных авариях;

- физическую защиту реактора АСММ и ядерных материалов;

- выполнение санитарных и противопожарных требований нормативных документов, регламентирующих вопросы проектирования и строительства зданий специального назначения.

При разработке технико-экономического обоснования (проекта) с учетом организационных и технических мер необходимо подтверждение соответствия площадки установленным критериям безопасности на основании:

- ограничения влияния процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, выявленных в районе размещения и на площадке, на безопасность вновь размещаемой атомной станции с учетом их неблагоприятных сочетаний;

- исключения радиационного воздействия на население и окружающую среду;

- учета характеристик окружающей среды, способствующих переносу или накоплению радиоактивных веществ;

- обеспечения безопасного транспортирования ядерного топлива, отработавшего ядерного топлива, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов;

- реализации условий проведения среди населения эвакуационных мероприятий в сроки, обеспечивающие не превышение дозовых критериев по обязательной эвакуации, предусмотренных нормами радиационной безопасности;

- обоснования возможности ликвидации последствий проектных и запроектных аварий, а также принятия оперативных мер по предотвращению несанкционированных действий в отношении подземного и наземного комплексов АСММ [7–11].

Для подземной АСММ предусматривается создание и функционирование системы горнотехнического мониторинга за 6–12 месяцев до начала сооружения, а также в течение всего периода строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации объекта. Глубина заложения подземной АСММ обосновывается с учетом параметров внешних природных и техногенных воздействий на объект и его потенциального влияния на население и окружающую среду.

Критерии оценки сейсмической опасности предусматривают возможность маловероятных сейсмических событий с серьезными последствиями, а также влияние следующих друг за другом афтерштов (повторный сейсмический толчок меньшей интенсивности по сравнению с главным сейсмическим ударом) с высокой магнитудой. При проектировании АС афтершты не учитываются вследствие их предполагаемой низкой сейсмической мощности, однако при аварии на АЭС «Фукусима» после основного толчка последовал ряд афтерштов с высокой магнитудой (более 7). Это свидетельствует о необходимости при определении сейсмической безопасности площадки провести переоценку влияния афтерштов с высокой магнитудой [12].

Социально-экономические критерии основываются на выделении ключевых содержательных сторон экономической системы. Среди них необходимо отметить способ координации экономической деятельности, способ соединения непосредственных производителей со средствами производства, степень развития индустриальных и экономических факторов. При выборе площадки под строительство радиационно опасных объектов среди социально-экономических условий нужно выделить: доступность площадки, плотность населения, демографическую ситуацию, расстояние до крупных населенных пунктов, близость к охраняемым территориям, использование земель, наличие полезных ископаемых и водных ресурсов. На последней стадии выбора площадок на основании экспертных оценок устанавливается ее соответствие критериям приемлемости, затем после сравнения обобщенного индекса значимых факторов осуществляется окончательный выбор о приоритетности площадок [12].

В условиях многолетнемерзлых грунтов в качестве критериев необходимо учитывать тепло- и массообменные процессы, а также взаимодействие грунтов с подземными конструкциями, так как все это влияет на устойчивость сооружений. Криолитозона характеризуется отрицательными температурами горных пород и наличием подземных льдов. В ее состав входят ММГП, подземные льды и непромерзающие горизонты сильноминерализованных подземных вод. Многолетняя мерзлота оказывает влияние не только на подземные воды, режим и питание рек, распространение озер и болот, но и на многие другие компоненты природы (рельеф, почвы, растительность), а также на хозяйственную деятельность человека [13, 14]. Технология подземного строительства в криолитозоне в значительной степени характеризуется сложностью и высокой стоимостью строительства горных выработок.

2.3. Программа инженерно-геологических исследований на площадках размещения АСММ

Для проведения инженерно-геологических работ на начальном этапе выбора площадки для строительства АСММ разрабатывается программа исследований, которая регламентируется действующими нормативно-техническими документами и включает следующие основные разделы [8, 9].

Геодезия и картография. Дается описание физико-географических и топографо-геодезических условий конкурентных пунктов для размещения АСММ, приводятся сведения о топографической и геодезической изученности территорий конкурентных пунктов размещения и данные, характеризующие развитие (состояние) современных движений земной коры и ее приповерхностных слоев на глубинах заложения фундаментных плит основных сооружений объекта.

На основании проведенных полевых и камеральных исследований определяются числовые характеристики современных движений земной коры, ее приповерхностных слоев и выделяются участки (сплошные блоки) земной коры, приоритетные для размещения площадок, подготавливается соответствующего масштаба топографо-картографический материал по каждому пункту размещения АСММ.

Региональная геология и тектоника. Рассматривается характеристика района расположения АСММ в радиусах 200–300, 40 и 25 км в разных масштабах. Характеризуются основные тектонически активные структуры и разломы, осуществляется анализ истории их развития, новейших движений, глубинного строения земной коры, структуры поверхности складчатого основания чехла, современных движений земной коры, активных физико-геологических процессов и явлений, опасных при строительстве и эксплуатации АСММ.

Сейсмология и сейсмотектоника. Описываются все исторические и инструментальные данные о землетрясениях района расположения АСММ, рассматривается характеристика сети сейсмических станций, приводятся данные о местных землетрясениях в радиусе 200–300 км, экзо- и техногенного происхождения и потенциальных зон ВОЗ в радиусе около 25 км, выполняется оценка сейсмической и тектонической опасности в ближней зоне.

Должно быть проведено сопоставление сейсмических проявлений с геологическими структурами, а также определены зоны возможного возникновения очагов землетрясений и их параметры сейсмичности, сформулирована обобщенная сейсмотектоническая модель, учитывающая воздействия от удаленных сильных очагов землетрясений, зон ВОЗ в районе размещения АСММ и ближней зоны. Необходимо определить интенсивность и ускорение колебаний грунта для каждой площадки при ПЗ и МРЗ.

Инженерная геология и гидрогеология. Приводится описание гидрогеологических и инженерно-геологических условий, развития физико-геологических явлений и процессов на конкурентных пунктах для размещения АСММ с оценкой каждого пункта по этим показателям, определяющим возможность размещения площадки основных гидротехнических сооружений, трасс коммуникаций и др. На основании проведения полевых, лабораторных и опытных исследований определяются физико-механические свойства грунтов, проводится выделение инженерно-геологических элементов, предварительная оценка виброустойчивости, сорбционной способности грунтов и миграции

радионуклидов в подземных водах. Также осуществляется предварительная оценка событий, связанных с деятельностью человека, и определяется степень влияния АСММ на окружающую среду.

Должны быть представлены гидрографическая сеть района размещения системы конкурентных пунктов АСММ, гидрологическая характеристика источника (возможных источников) технического водоснабжения, указаны водопользователи и водопотребители, существующие сооружения, водозаборы и их назначение, водоснабжение, орошение, судоходство, гидротехника, лесосплав и т. д. Рассматривается водохозяйственный баланс территории, фоновая химическая и биологическая загрязненность водных объектов в районе размещения АСММ.

Метеорология и аэрология. Рассматриваются основные параметры климатического режима, климатические характеристики неблагоприятных метеорологических явлений, расчетные данные об опасных экстремальных метеорологических явлениях редкой повторяемости, коррозионная активность, запыленность и загрязненность атмосферы, климатические условия атмосферной дисперсии, матрица (среднегодовая) совместной реализации категорий устойчивости атмосферы, скорости и направления ветра. Учитывается возможность появления опасных, особо опасных и катастрофических явлений (туманов, града, гололеда, метелей, гроз, пыльных и песчаных бурь, смерчей, ураганов, штормов, тропических циклонов и т. п.).

Обеспечение водными и земельными ресурсами. Приводится краткая гидрологическая, гидробиологическая и гидрохимическая характеристика основных водных объектов рассматриваемого района в объеме, достаточном для установления возможности их использования в целях водоснабжения объектов АСММ, наличие и оценка возможности использования подземных вод, потребность в земельных ресурсах.

Природно-географическая, социально-производственная и демографическая характеристика района. Определяется тип природно-географической зоны района, а также рельеф, наличие лесов, оврагов, балок, пойм, заболоченности, заповедных зон, санаториев, зон массового отдыха, охраняемых государством исторических и археологических памятников и т. д. Рассматриваются характерные черты растительного и животного мира, охраняемые редкие виды животных, пути их миграции, рыбохозяйственная характеристика водных источников, отличительные особенности используемых в сельском хозяйстве земель, продуктивность земель и урожайность сельскохозяйственных угодий.

Транспортная сеть. Автомобильная, железнодорожная и водная транспортные сети и их характеристика. Воздушные транспортные коридоры и их характеристика.

Плотность и распределение населения. Дается характеристика населенных пунктов района размещения с прогнозом численности населения на весь период эксплуатации АСММ, включая плотность населения, обустройство жилого фонда. Рассматривается размещение промышленных предприятий, расположенных на территории района, их влияние на безопасность работы АСММ и обслуживающего персонала.

Техногенные условия. Приводится краткий анализ источников техногенной опасности в районе размещения АСММ (лесные массивы, взрывоопасные объекты, аэродромы, зоны пилотажа, стратегические объекты,

тьюрмы и пр.) с указанием координат их расположения. Дается оценка вероятности исходных событий техногенного происхождения и параметров их воздействия.

Охрана окружающей среды. Рассматриваются основные данные о радиоактивных и других загрязнителях в окружающей среде, предусмотренные РОЭБ АС-91 («Руководство по разработке и содержанию обоснования экологической безопасности атомных станций») при нормальной работе АСММ и аварийных ситуациях.

2.4. Ранжирование площадок для размещения АСММ

Решающий аспект в выборе той или иной площадки будет в первую очередь связан с обеспечением экологической безопасности и экономической приемлемости. При подземном размещении станции основную роль будут играть технические факторы, которые связаны с проектными технологическими разработками.

Решение о том, включать или не включать данный критерий при ранжировании альтернативных площадок, зависит от степени влияния этих критериев. Если, например, все рассматриваемые площадки, выбранные для строительства, находятся в одинаковых сейсмических зонах, вопрос сейсмостойкости может быть исключен из сравнительного анализа альтернативных площадок. Он должен учитываться непосредственно при принятии решений при строительстве. Кроме того, если стоимость земли для всех рассматриваемых площадок одинакова, ее можно не включать в сравнительное рассмотрение. Данное утверждение особенно показательное для отдаленных малонаселенных районов северо-востока страны. Это общее правило позволяет исключить многие вопросы при изучении проблемы выбора площадок.

Во многих случаях можно предположить, что прибыль от подземной АСММ в случае реализации предполагаемого проекта будет практически такой же, как и для других альтернативных вариантов. Многие статьи эксплуатационных расходов также не зависят от особенностей площадки. Если станции идентичны и эксплуатация связана с внутренними особенностями их функционирования, то такое утверждение справедливо.

В отдаленном районе с низкой плотностью населения может оказаться, что социально-экономическое влияние будет практически одинаково для всех рассматриваемых площадок, при этом нет необходимости при ранжировании учитывать эти факторы.

Предпочтительность одной площадки по отношению к другой зависит от множества факторов. Несмотря на имеющиеся и признанные международным сообществом рекомендации относительно выбора площадок для подземных радиационно опасных объектов, типовая методология сравнения вариантов площадок, как и выбора оптимальных из них, до настоящего времени не разработана.

Можно выделить пять главных групп факторов, на ранжировании которых базируется проблема размещения энергетических объектов:

- окружающая среда;
- экономика;

- социальная сфера;
- безопасность населения;
- общественное мнение.

Площадка считается пригодной для размещения АСММ, если имеется возможность обеспечить ее безопасную эксплуатацию с учетом процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения. При этом должна обеспечиваться безопасность населения и защита окружающей среды от радиационных воздействий при нормальной эксплуатации и проектных авариях, а также ограничение этих воздействий при запроектных авариях [6].

При выборе площадки очень важно установить природные факторы, которые при эксплуатации атомной станции могут повлиять на безопасность как самого ядерного объекта, так и на прилегающие территории. Влияние места размещения связано со многими характеристиками природной и техногенной среды (сейсмотектоническими, геофизическими, инженерно-геологическими, гидрологическими, аэрометеорологическими, экологическими, радиологическими), а также с условиями землепользования и рядом других.

Таким образом, выбор места размещения является многофакторной задачей и окончательное заключение может быть сделано только после исследований всех характеристик и технико-экономической оценки. Площадки могут отличаться разным влиянием этих факторов, что заставляет проводить тщательный анализ альтернатив размещения энергетического объекта.

Ранжирование выбранных площадок осуществляется по результатам наилучших оценок методом экспертных оценок по многобалльной системе. По этой методике каждая площадка набирает определенное количество баллов в соответствии с таблицей баллов для каждого конкретного критерия. Диапазон изменения баллов при ранжировании площадок колеблется от 1 до 10, и наименьшее количество баллов соответствует самым неблагоприятным условиям. После того как каждый критерий с определенным по значимости весом будет применен к каждой площадке, рассчитывается общий итог ранжирования.

В качестве основных закономерностей при ранжировании площадок для подземного расположения АСММ в районе многолетней мерзлоты установлено ограничение общего числа учитываемых критериев, а также снижено значение социальных, горно-геологических и географических.

Площадку экономически выгоднее располагать в непосредственной близости к промышленному объекту. При этом повышается значение горнотехнических критериев, особое внимание должно быть уделено вопросам тепловой защиты породного массива. При ранжировании исключается этап, связанный с выбором перспективных участков размещения АСММ, в этом случае достаточно будет рассмотреть несколько прилегающих к промышленному объекту площадок и выбрать из них наиболее предпочтительную.

Мировая практика выбора площадок для атомных станций характеризуется большим разбросом стоимостных показателей — от нескольких сотен тысяч до нескольких миллиардов долларов США. Это связано, прежде всего, со степенью изученности данного района и с наличием первоначальной инженерно-геологической информации. При ранжировании площадок существуют запрещающие критерии, которые необходимо обязательно учитывать [8, 9].

Не допускается размещать АСММ:

- на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах;
- на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью МРЗ более 8 баллов по шкале сейсмической активности Медведева — Шпонхойера — Карника (MSK-64);
- на территории, в пределах которой нахождение АС запрещено природоохранным законодательством.

Неблагоприятными для размещения АСММ считаются:

- территории действующих вулканов или активного грязевого вулканизма;
- территории, подверженные воздействию цунами, катастрофических паводков или наводнений;
- территории, которые могут быть затоплены волной прорыва напорного фронта водохранилищ;
- зоны схода селевых потоков;
- районы, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью МРЗ более 7 баллов по шкале MSK-64;
- территории, на которых установлены современные дифференцированные движения земной коры (вертикальные — со скоростью более 10 мм/год, горизонтальные — более 50 мм/год);
- зоны тектонических нарушений;
- районы развития карста (термокарста);
- территории с заброшенными горными и другими выработками;
- районы развития активных оползневых и других опасных склоновых процессов;
- пойменные террасы рек и берега водоемов со скоростью перемещения линии среза и бровки абразионного уступа более 1 м/год;
- склоны с уклоном 15° и более;
- площадки с грунтовыми водами на глубине менее 3 м от поверхности в грунтах мощностью 10 м и более с коэффициентом фильтрации 10 м/сут и более;
- районы распространения структурно и динамически неустойчивых грунтов, многолетнемерзлых нескальных грунтов, а также грунтов с модулем деформации менее 20 МПа;
- территории, в пределах которых расположены объекты, включая склады боеприпасов, при пожаре и взрыве на которых возможны выбросы токсичных веществ и другие воздействия, превышающие проектные.

В неблагоприятных районах и зонах, характеризующихся наличием опасных процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, допускается размещать АСММ при проведении технических и организационных мероприятий по обеспечению безопасности.

Одним из основных требований при оценке возможности строительства АСММ является обеспечение безопасности ее эксплуатации для окружающего населения, которая регламентируется нормами радиационной безопасности. К мероприятиям защиты окружающей среды — территории и населения от вредных воздействий при эксплуатации АСММ — можно отнести организацию вокруг нее санитарно-защитной зоны. В санитарно-защитной зоне запрещается проживать населению.

2.5. Общий алгоритм оценки и выбора площадок для размещения АСММ

2.5.1. Методология выбора площадок

Размещение подземных радиационно опасных объектов в достаточной степени изученных геологических формациях Северо-Западного региона России в основном соответствует требованиям экологической безопасности. Однако при рассмотрении северо-восточных регионов России очевидны их характерные особенности. Это связано с более суровыми климатическими условиями, удаленностью от промышленных центров, наличием больших территорий с многолетней мерзлотой, неудовлетворительной технической оснащенностью и низкой энерговооруженностью. Результаты выполненных ранее исследований показали, что специфика выбора площадок для подземных радиационно опасных объектов обуславливает необходимость дальнейшего развития научно-методических принципов с целью создания комплексного обоснованного подхода к выбору геологических формаций при принятии решений. В то же время необходимо отметить, что решение рассматриваемой проблемы потребует новых подходов, учитывающих специфику регионов планируемого размещения подземных АСММ.

Основные требования. Целью методологии является аргументированное обоснование выбора приемлемой площадки для размещения подземной или заглубленной АСММ. К методологии выбора предъявляются общие требования, основанные на качественном анализе, удобстве практического применения и доступности для понимания. Качество анализа должно разъяснять экспертные оценки, ценностные соотношения и данные, которые используются при исследованиях. При идентификации площадок все используемые критерии должны быть четко определены и обоснованы. Качество анализа означает, что каждый фактор проблемы размещения должен рассматриваться применительно к каждой площадке. Из-за неопределенностей, присущих любому исследованию площадок, возможно, потребуется предусмотреть проведение анализа чувствительности к исходным данным.

Методология должна позволять проводить исследования площадки в реальных условиях, и затраты на ее проведение должны составлять доли процента от стоимости энергетического объекта. Из-за сложной социально-общественной ситуации на этапе выбора площадки привлекается много различных лиц и групп — работники административных органов, акционеры, местное население и др. Это означает, что методология должна ответственно и наглядно учитывать интересы и проблемы этих лиц и групп. Предполагается, что процесс выбора площадки будет осуществляться в несколько этапов.

I этап. Идентификация возможных площадок. На этапе идентификации определяются контуры района, в пределах которого рассматриваются возможные площадки. Обычно для наземных атомных станций рассматриваются несколько районов. Для подземной АСММ район будет ограничен территорией, прилегающей к промышленному объекту потребителя. Теоретически может быть рассмотрено от 3 до 10 возможных площадок. Поэтому нецелесообразно тщательно оценивать все возможные площадки и обоснованно исключить наихудшие из них, чтобы сосредоточить внимание на потенциально приемлемых участках расположения объекта. В табл. 2.1 приведен анализ неблагоприятных показателей для АСММ

подземного и наземного размещения (знак «-» характеризует показатель как отрицательный, знак «+» — как удовлетворительный). Используется имеющаяся информация, в первую очередь — открытая и общедоступная.

Таблица 2.1

Анализ неблагоприятных показателей для размещения АС [10, 11]

Неблагоприятные показатели	Наземная АСММ	Подземная АСММ	Оценка для подземной АСММ
Территории действующих вулканов или активного грязевого вулканизма	-	-	Неблагоприятно
Территории, подверженные воздействию цунами, катастрофических паводков	-	+	Не представляет угрозы
Территории, которые могут быть затоплены волной прорыва напорного фронта водохранилищ	-	+	То же
Зоны схода селевых потоков	-	+	Не влияет
Районы, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью МРЗ более 7 баллов по шкале MSK-64	-	+	То же
Территории, на которых установлены современные движения земной коры	-	-	Неблагоприятно
Зоны тектонических нарушений	-	+	Требуется дополнительные мероприятия
Районы развития карста (термокарста)	-	-	Неблагоприятно
Территории с заброшенными горными и другими выработками	-	+	Не влияет
Районы развития активных оползневых и других опасных склоновых процессов	-	+	То же
Склоны с уклоном 15 и более	-	+	«
Площадки с грунтовыми водами на глубине менее 3 м от поверхности в грунтах мощностью 10 м и более с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут	-	+	«
Террасы рек и берега водоемов со скоростью перемещения линии среза и бровки уступа более 1 м/год	-	+	«
Районы неустойчивых грунтов, многолетнемерзлые нескальные грунты, грунты с модулем деформации менее 20 МПа	-	-	Требуется дополнительные мероприятия
Территории, в пределах которых расположены объекты, включая склады боеприпасов, при пожаре и взрыве на которых возможны выбросы токсичных веществ и другие воздействия, превышающие проектные	-	+	Не влияет

На первом этапе осуществляется выбор района, в котором будут определены возможные площадки, отобранные на основании ограничивающих критериев (запрещающие и неблагоприятные показатели). Для большинства критериев отбора требуется, чтобы ценовые показатели формулировались заказчиком.

В результате формализованного отбора остается ряд относительно однородных зон района, представляющего интерес. Среди них можно ожидать наличия наилучших потенциальных площадок. На этом этапе каждый из участков посещается членами группы по выбору площадки. Принципиальная схема проведения процедуры идентификации показана на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Принципиальная схема проведения процедуры идентификации

II этап. Определение целей и критериев. В процедуре выбора площадки должны быть определены цели и критерии для того, чтобы измерить степень достижения целей при выборе каждой из возможных площадок. Основой для проведения этого этапа являются пять главных групп факторов: окружающая среда, экономика, социальная сфера, здоровье и безопасность населения. При выработке целей и формировании критериев необходимо определить экологическое влияние энергетического объекта и способы его измерения. Ряд вопросов возможно решить с экологами и другими группами заинтересованных лиц. Критериев может быть очень большое количество, все они имеют разный удельный вес и влияние при выборе площадки, поэтому определенное значение уделяется распределению их по значимости.

На основе этой информации образуется иерархия критериев цели с большим обобщением на верхнем уровне и с подробной детализацией на нижнем уровне. Для каждой из целей нижнего уровня в иерархии необходимо идентифицировать определенные критерии. Очевидным критерием цели «минимизировать стоимость строительства» или «минимизировать стоимость перекачки воды для работы реактора» является стоимость, определяемая в денежном выражении [6].

Чтобы выявить факторы, способствующие определению большей пригодности одной площадки для размещения АСММ по сравнению с другой, делают подробное описание площадок. Собранная информация включает данные: о районе расположения площадки и ее использовании в настоящее время, о форме собственности, о качестве и количестве воды, о существующих источниках водоснабжения, об особенностях природных факторов, включая геологические, топографические, возможности наводнения, о населении в районе площадки,

о флоре, фауне района и рыбных ресурсах, о возможности использования различных видов транспорта в период строительства и эксплуатации объекта, о наличии местной рабочей силы.

На следующей стадии необходимо сформулировать и определить потенциальные цели и их критерии, условия и ограничения для оценки площадок. Из этого большого перечня после изучения необходимо оставить наиболее существенные критерии, для каждого из них устанавливается шкала измерения значений и определяются диапазоны возможных воздействий. Критерии разделяются на два класса: относящиеся к первому имеют естественную шкалу (основная мера задана количественно), ко второму — искусственную. Так, например, дифференциальные затраты в рублевом эквиваленте имеют естественную шкалу, что в расчетах выглядит более конкретно и весомо. В табл. 2.2 показаны критерии и диапазон их значений при оценке возможных площадок для подземной АСММ. Например, критерий X_1 , характеризующий населенность района площадки, используется, чтобы определить относительную радиационную опасность для людей. С увеличением расстояния до площадки снижается опасность облучения населения. Таким образом, территории с отсутствием населения будут предпочтительными.

Таблица 2.2

Критерии и их диапазон при оценке площадок для подземной АСММ [6]

Учитываемая главная группа факторов	Критерии	Значение критерия	
		наихудшее	наилучшее
Воздействие на здоровье и безопасность людей	X_1 — населенность в районе площадки, чел/км ²	100	0
Воздействие на окружающую среду	X_2 — потеря рыбных ресурсов	–	–
	Y — количество ценного ресурса в реке, тыс. шт.	150	0
	Z — процент потерь	20	5
	X_3 — биологическое воздействие объекта площадки	Табл. 2.3	–
	X_4 — длина тепломагистрали, проходящей через охраняемую природную среду, км	>5	1
Социальная экономика	X_5 — социально-экономическое воздействие	Табл. 2.4	–
Экономика	X_6 — капитальные затраты (экологические мероприятия), млн руб.	>50	20

Влияние на рыбные ресурсы, которое оценивается критерием X_2 и характеризуется двумя показателями Y (количество) и Z (процент потерь), определяется для каждого водоема отдельно, так как генетический состав

популяции индивидуален. Критерии X_3 и X_5 (табл. 2.2) описывают особенности и характер возможных воздействий.

В табл. 2.3 приведена искусственная шкала для оценки биологических воздействий, которая разработана специалистами в области экологии [6].

Таблица 2.3

Шкала для оценки биологических воздействий подземной АСММ (X_3) [6]

Значение по шкале	Характер или масштаб воздействия
8	Потеря 0,25 км ² земли, полностью используемой в сельском хозяйстве или занятой лесом; нет потерь районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
7	Потеря 0,25 км ² земли, на 75 % используемой в сельском хозяйстве и на 25 % занятой лесом; нет потерь районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
6	Полная потеря 0,25 км ² земли, на 50 % используемой в сельском хозяйстве и на 50 % занятой лесом; нет заметных потерь районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
5	Потеря 0,25 км ² земли, нарушение на окружающих обрабатываемых землях в пределах 1 км; и (или) потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
4	Полная потеря 0,25 км ² земли, на 50 % используемой в сельском хозяйстве и на 50 % занятой лесом; и (или) потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
3	Полная потеря 0,25 км ² земли, которая на 75 % имеет пустынный характер и на 50 % занята лесом; и (или) потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
2	Полная потеря 0,25 км ² спелого леса или потеря 50 % крупных диких животных и (или) 50 % увлажненных земель, и (или) потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
1	Полная потеря территории в 0,25 км ² с биологическим сообществом или районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения
0	Полная потеря территории в 0,25 км ² леса и (или) сильно увлажненных земель и районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения

Это качественная шкала кратко- и долгосрочных воздействий, которые могли бы возникнуть в результате строительства и эксплуатации АС на выбираемой площадке. Значение воздействия по шкале меняется от 8 при отсутствии воздействия до 0 при максимальном воздействии. Не менее важными биологическими факторами (помимо водных ресурсов) являются:

- наличие девственного (или высоковозрастного) леса, а также участков дикорастущих трав;
- известные и потенциальные районы обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения;
- районы с сильным увлажнением, болота.

Показатель социально-экономического воздействия оценивается критерием X_5 и учитывает влияние быстрого роста населения, работу городских служб, нагрузку на культурные учреждения, общественный порядок, изменение в налоговой политике, влияние на городские административные службы, изменения в законодательстве об использовании земли и т. д. Шкала для оценки социально-экономического воздействия представлена в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Шкала для оценки социально-экономического воздействия (X_5) [6]

Значение по шкале	Тип населенного пункта, его расположение относительно площадки, характер и масштаб воздействия на него
7	Район в окрестностях города с населением 100 тыс. чел. Никаких заметных воздействий
6	Среднеудаленный поселок с населением 250 чел. Строительство вахтовым методом, изменения в социальной структуре, задержка в погашении кредитов
5	Отдаленный поселок с населением 250 чел. Заметное воздействие на культурную жизнь поселка. Растет база налогообложения, задержка в погашении кредитов до 1 года
4	Среднеудаленный город с населением 25 тыс. чел. Половина строителей переехала в город. Все городские службы перегружены, требуется внешняя финансовая помощь. Задерживается налогообложение и выплата по кредитам 1–2 года
3	Удаленный город с населением 25 тыс. чел. Наблюдается воздействие на все городские службы, нарушена система использования земельных участков, идет рост населения. Задерживается налогообложение и выплата по кредитам до 2 лет
2	Удаленный поселок с населением 1500 чел. Многие строители ездят на работу из других районов. Ведется строительство жилья. Социальная и культурная системы перегружены. Задерживается выплата по кредитам более 2 лет
1	Удаленный поселок с населением 1500 чел. Наблюдается воздействие на городские службы. Сильное влияние на культурную жизнь и социальную структуру города
0	Удаленный город с населением 10 тыс. чел. Наблюдается сильное воздействие на город. Задержка по выплатам кредитов несколько лет. Неизбежно банкротство

III этап. Описание возможных воздействий энергетического объекта.

Известно, что при определенных обстоятельствах возможно негативное воздействие подземной атомной станции на выбранную площадку. Для каждой

площадки необходимо описать несколько воздействий, составляя список различных возможных последствий и вероятностей, которые могут иметь место. Как правило, трудность этой процедуры заключается в неопределенности таких последствий. Это можно сделать формализованно, путем оценки для каждой площадки функции распределения вероятностей. Оценка вероятности последствий выполняется, когда это возможно, с помощью формализованных моделей. Такие модели могли бы определять возможные масштабы воздействий, которые характеризуются соответствующими критериями для каждой площадки. При описании возможных воздействий необходимо указывать время, когда эти воздействия могут произойти. Таким образом определяется долговременность прогноза. В некоторых источниках предлагается проводить описание таких воздействий, как задержка, связанная с лицензированием и строительством, эксплуатационная надежность и неопределенность в правительственных решениях. Они также определяются путем оценки вероятностей, описывающих возможные влияния каждого из факторов. При существовании неопределенности последствий возможно применение прямых экспертных оценок, которые носят количественный характер. Имеется два основных способа выполнения таких оценок: прямое определение всего распределения вероятности, а также выбор стандартного распределения вероятности и прямое определение параметров для вида этого распределения. Ниже приведены основные экономические, экологические и социально-экономические воздействия при выборе площадок.

Экономические воздействия:

- затраты на сооружение и эксплуатацию объекта на площадке.

Экологические воздействия:

- потеря ценных рыбных промыслов;
- изменения в природной среде вокруг площадки;
- изменение в расселении животных;
- изменение флоры в районе расположения тепло- и электромагистрали;
- загрязнение окружающей среды отвалами пустых пород от строительства

подземного комплекса.

Наибольшие последствия для окружающей среды от размещения энергетических объектов вызваны использованием или загрязнением местных природных ресурсов, таких как воздух, вода или земля. Поэтому, если итогом является загрязнение природы, должны быть определены критерии, относящиеся или к распространению и концентрации загрязнителя, или к количеству и видам животных, на которых влияет этот загрязняющий фактор.

Социально-экономические воздействия:

- влияние на зоны отдыха, на сохранность исторических и археологических ценностей;
- изменения в системе использования земель, в условиях жизни местного населения, экономики рыбных и охотничьих промыслов, роста населения, развития местной инфраструктуры.

Для каждой из возможных площадок необходимо установить набор возможных воздействий. Такие оценки могут базироваться на существующих данных, взятых из литературных и других источников, а также на изучении общественного мнения и экспертных оценках.

IV этап. Оценка воздействий энергетического объекта. На этом этапе необходимо выразить количественно приемлемость каждого из возможных

последствий. На основании этого сравнительного критерия делают вывод о предпочтении той или иной площадки. В качестве критериев оценки можно выделить воздействие АСММ на население и окружающую среду прилегающего района. Возможны определенные изменения в окружающей среде в период строительства, эксплуатации, а также в случае аварии, прежде всего, это изменение при строительстве, касается оно ландшафта, вырубки на определенной территории леса, влияния водозабора из прилегающих водных источников и т. д.

Очередной этап анализа должен оценить относительную приемлемость последствий x_i , которая определяется как количественная мера, значение или уровень критерия X_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Таким образом, x_i может иметь значение в денежном эквиваленте или другой физической величины, что будет являться мерой измерения критерия X_i .

Применяя метод анализа решений, используют функции полезности. Многокритериальная теория полезности дает методы и процедуры, позволяющие выполнить эту задачу [6]. Необходимо определить функцию полезности $u(x_i)$ через принятое на рассмотрение количество критериев X_i . В функции полезности каждому значению соответствует значение возможного последствия. В общем виде функция полезности представлена в виде:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i), \quad (2.1)$$

где u и u_i — функции полезности, изменяющиеся от 0 до 1; k_i — весовой коэффициент, причем $0 < k_i < 1$.

Уравнение (2.1) представляет функцию полезности, равную сумме нескольких переменных значений. При оценке полезности однокритериальной функцией устанавливается начальное значение и масштаб.

Полезность наихудшего значения принимается равной 0, наилучшего — 1. Для каждого описываемого критерия своя функция. Также воздействие радиационно опасного объекта можно определить методом экспертных оценок, эмпирически сравнивая воздействие на окружающую среду, флору и фауну, воду и земную поверхность в периоды строительства и эксплуатации объекта.

На рис. 2.6 представлена обобщенная модель воздействия загрязнения окружающей среды, где загрязнение распространяется в зависимости от погодных условий и концентрации загрязняющих веществ.

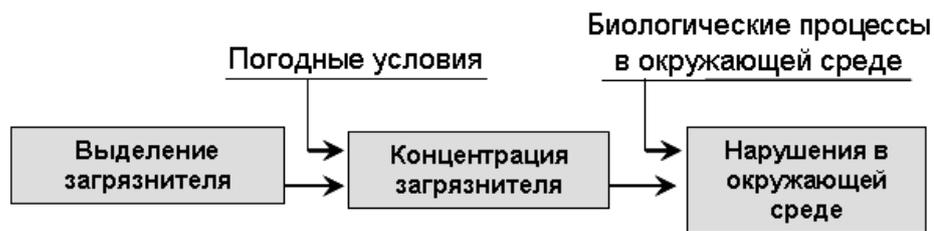


Рис. 2.6. Обобщенная модель воздействия загрязнения окружающей среды

Также можно дать оценку воздействия на ценные виды флоры и фауны. Необходимо идентифицировать показатели неблагоприятного влияния на окружающую среду, которые наглядны, широко используются и приемлемы

практически во всех ситуациях. Для количественной оценки предпочтительно построение шкалы возможных кратко- и долгосрочных воздействий.

Оценка экономического влияния является следствием многих причин и связана с неопределенностями затрат, не зависящих от заказчика. Стоимость рубля, затраченного на строительство, не обязательно равна стоимости рубля, затрачиваемого на эксплуатацию или обслуживание, а стоимость рубля в данный момент времени может отличаться от его стоимости в более поздний период времени.

На строительные затраты могут значительно повлиять геологические условия на площадке. Такие природные явления, как оползни или землетрясения, способны вызвать задержку строительства, повредить оборудование или привести к остановке строительства. Другие неопределенности могут быть вызваны деятельностью человека. От таких факторов, как забастовки, возможные судебные решения, задержки в лицензировании, также сильно сильно зависит стоимость строительства энергетического объекта. Кроме того, следует отметить, что в настоящее время рост капитальных затрат опережает инфляцию.

Одним из практических способов описания экономических воздействий является моделирование, а главным недостатком — отсутствие анализа неопределенностей. Модели затрат не учитывают такие ситуации, как повреждения объекта или потребность во внеплановом ремонте. В настоящее время в некоторых странах разработаны модели землетрясений, предсказывающие их вероятность и интенсивность в определенные временные периоды, другие модели касаются ураганов, наводнений и т. п. В экономическом анализе можно оценить и вероятность стихийных бедствий. В экономическом сравнении не делают подробного рассмотрения полной стоимости станции для каждой площадки, но выполняется представительная оценка приведенных во времени затрат на строительство каждой площадки. В качестве показателя возможно использование дифференциальных затрат — разницы между приведенными затратами для данной площадки и затратами для наименее дорогостоящей площадки. В дифференциальных затратах могут также учитываться расходы на непредвиденные обстоятельства и процентные ставки по кредитам.

V этап. Анализ и сравнение возможных площадок. Для оценки возможных площадок используется такой показатель, как ожидаемая полезность. Расчет ожидаемой полезности осуществляется с учетом распределения вероятности p_j для каждой площадки и функции полезности u , которые определяются на предыдущих этапах анализа. Расчет представляет собой суммирование вероятностей каждого из возможных последствий, умноженных на полезность этого последствия. Таким образом, формализованно комбинируется вероятность и предпочтительность последствий. В результате получается ожидаемая полезность $E_j(u)$ для каждой площадки [6]:

$$E_j(u) = \int_x p_j(x)u(x)dx . \quad (2.2)$$

Чем больше значение $E_j(u)$, тем выше приемлемость варианта. Таким образом, значение ожидаемой полезности, отражающей предпочтение одному набору последствий перед другим, может быть использовано для ранжирования последствий. Необходимо отметить, что ожидаемая полезность, определяющая выбор варианта, прямо связана с критериями, предварительно выбранными для проведения анализа.

По расчетам ожидаемой полезности также можно провести ранжирование площадок, цель которого — сравнение численных значений различных показателей, характерных для рассматриваемых площадок. Сравнение выбранных площадок можно осуществить, например, по наилучшему значению ожидаемой полезности и годовым дифференциальным затратам на строительство. Общий алгоритм выбора площадки для подземной АСММ показан на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Алгоритм выбора площадки для подземной АСММ

Значение ранга и ожидаемые полезности для площадок показывают, какие из них лучше других при учете всех отобранных критериев, однако нагляднее рассматривать различие в ожидаемых полезностях только по одному критерию. Для этого для каждой площадки приводятся ежегодные дифференциальные затраты эквивалентной площадки с критериями, находящимися на их лучших уровнях. Эквивалентная площадка — это площадка с такой же ожидаемой полезностью, как и у соответствующей реальной площадки. По результатам оценки критериев к каждой площадке рассчитывается общий итог ранжирования. В некоторых случаях определенное значение будет играть технико-экономическое сравнение выбранных вариантов.

На первом этапе выбирают предполагаемый район, в котором необходимо расположить подземную атомную станцию. Вопрос о районе, представляющем интерес, решается с заказчиком и определяется соображениями близости к потребителю. Все площадки, находящиеся вне этого района, не рассматриваются. На этапе идентификации определяют несколько приемлемых площадок

и последовательно проводят сравнение площадок с ограничивающими критериями (запрещающими и неблагоприятными для размещения). Для дальнейшего анализа площадок производят сбор данных по площадкам.

На втором этапе определяют критерии для достижения поставленных целей при обосновании площадки. Рассматриваются условия и ограничения по площадкам, выбирают существенные критерии для данного района. Оценочные параметры каждой из площадок могут быть представлены как техническими, так и социально-экономическими характеристиками.

Окончательная оценка предварительно выбранных площадок осуществляется посредством многофакторного анализа. Анализ и сравнение возможных площадок осуществляют путем ранжирования и технико-экономического сравнения. Выбор и утверждение наиболее предпочтительной площадки происходит на последнем этапе.

2.5.2. Учет инженерно-геологических, горнотехнических и социально-экономических особенностей при подземном размещении АСММ

В отличие от атомных станций наземного размещения, подземные АСММ имеют ряд особенностей, касающихся инженерно-геологических, горнотехнических и социально-экономических факторов, которые необходимо учитывать при выборе площадки.

Изолированность энергосистемы. АСММ предполагается использовать для энергоснабжения труднодоступных и удаленных территорий, где основная роль в обеспечении энергетической безопасности отводится автономным энергоисточникам малой мощности. При развитии полного комплекса инфраструктуры после ввода в действие АСММ изолированность остается.

Размещение на труднодоступных территориях. Как правило, районы, где планируется строительство малых станций, находятся на труднодоступных территориях. Слабое развитие транспортной инфраструктуры, например на северо-востоке страны, серьезным образом осложняет проблему топливоснабжения потребителей. Также существует сезонная ограниченность периодов завоза необходимых материалов и продуктов на некоторых территориях. Даже в случае создания в перспективе транспортных систем, обеспечивающих максимально возможную доступность территории, зона автономного электроснабжения сохранится и большое значение по-прежнему будет иметь малая энергетика.

Локализованность. Наземные атомные станции с крупными реакторами обычно размещают на расстоянии нескольких десятков километров от населенных районов (не ближе 30 км), чтобы в случае аварии уменьшить угрозу для населения. Атомные станции малой мощности привязаны, как правило, к локальному объекту потребления. Этот фактор предопределяет расположение АСММ непосредственно в зоне функционирования промышленного объекта. Экономически выгодно размещать станцию на площадке, удаленной от потребителя электроэнергии в радиусе 3–5 км. При условии использования тепловой энергии расстояние до потребителя может составлять 1–3 км.

Техническая универсальность. Подземную АСММ, в отличие от наземной станции, можно разместить на площадке с более неблагоприятными горно-геологическими условиями, так как уровень техники в настоящее время позволяет

строить объекты в сложных горно-геологических условиях. С учетом развитости технологий современного подземного строительства станцию технически возможно построить в условиях многолетней мерзлоты.

Перспективность. Со временем в густонаселенных районах наиболее эффективным может стать подземное расположение АС малой мощности. Подземным размещением решаются две проблемы: станции получают защиту от любых внешних воздействий (техногенных, военных, террористических), а население и окружающая среда защищаются от последствий возможных инцидентов на объекте.

Модульные энергоблоки можно разместить в черте города в подземном пространстве аналогично типовой односводчатой станции метрополитена. Изготовление и монтаж таких модулей — стандартные, время сооружения и стоимость — приемлемые. Такое решение сокращает затраты на сооружение протяженных ЛЭП и теплотрасс, инфраструктуру и персонал, позволяет значительно снизить удельные затраты на строительство подземной АСММ по сравнению с традиционной АЭС.

Финансовые риски. Инвестиции в малую энергетику существенно меньше, чем в «большую», следовательно, снижаются и финансовые риски, что делает автономное электроснабжение за счет малой энергетики приемлемым для предприятий и организаций с ограниченным капиталом.

Защищенность. Отличительной особенностью подземной АС является то, что они лучше защищены от нежелательных внешних воздействий, более устойчивы к сейсмическим событиям, безопасны в случае возникновения аварии и вывода из эксплуатации. Автономные АСММ (в т. ч. с подземным размещением в густонаселенных районах) могут стать «островками стабильности» в форс-мажорных ситуациях (военных, социальных, экономических).

Структура многолетнемерзлых грунтов. Как правило, в таких грунтах выделяются два горизонта: верхний составляет порядка 12–20 м, он подвержен сезонным колебаниям температуры, нижний — в течение года имеет постоянную температуру [15]. В верхнем горизонте период и амплитуда колебаний температуры зависят от географического расположения местности, метеопараметров, снегоотложений, времени года, глубины от дневной поверхности и других факторов. На втором горизонте с понижением глубины температура возрастает. Геотермический градиент колеблется в пределах 0,02–0,035 °С/м. Температура на глубине годовых нулевых амплитуд в различных районах и условиях изменяется от 0 до –16 °С. Решающее влияние на температуру пород (грунтов) оказывают длительно действующие факторы, в первую очередь это период действия отрицательных температур наружного воздуха, продолжительность которого в криолитозоне составляет 180–240 суток.

Геологическое строение криолитозоны характеризуется большим разнообразием. На значительной ее части распространены дисперсные толщи, образованные преимущественно четвертичными и третичными отложениями, а в отдельных случаях и более древними породами. Дисперсные отложения различной мощности распространены на всей территории мерзлой зоны. Значительная их часть относится к числу достаточно мощных отложений, в пределах которых можно размещать подземные сооружения неглубокого заложения.

Строительство в многолетнемерзлых грунтах. Определенное значение для строительства приобретает выбор площадки в зоне многолетнемерзлых грунтов. Как правило, районы строительства характеризуются отдаленностью

и малой освоенностью территории. Строительство в зоне вечной мерзлоты, как правило, характеризуется суровым климатом и мерзлым состоянием грунтов, что ведет к повышению стоимостных показателей при строительстве.

Решение вопросов строительства подземных горных выработок связано в основном с обеспечением устойчивости подземных сооружений, а также с теплоизоляцией горных пород на всех этапах существования подземного сооружения.

Выбор участков недр для строительства горных выработок подземных АСММ в зоне многолетней мерзлоты следует производить с учетом следующих инженерно-геокриологических факторов подземного строительства:

- обеспечение устойчивости выработок требуемых размеров и форм;
- технологическое назначение и режим эксплуатации сооружений, размещаемых в подземном пространстве;
- действующие нагрузки на крепь;
- рельеф местности на участке предполагаемого строительства, обеспечивающий устройство преимущественно штольневых и слабонаклонных входов (выходов);
- возможность использования при строительстве высокопроизводительных технологий и выполнение мероприятий по защите подземного сооружения от природных источников воздействия в чрезвычайных ситуациях.

Согласно строительным нормам Республики Саха (Якутия) ТСН 31-323-2002 [13], участки недр, благоприятные для строительства подземных объектов, должны отвечать следующим требованиям:

- быть удаленными от тектонических разломов на расстояние не менее 1 км;
- состоять преимущественно из однородных массивов твердомерзлых осадочных пород, скальных и полускальных коренных пород;
- не содержать карстов, таликов, над- и межмерзлотных вод, не выделять вредных газов и отвечать требованиям норм радиационной безопасности;
- размещаться в зоне с постоянной, не изменяющейся в течение года отрицательной температурой пород (в зоне нулевых годовых амплитуд), на глубине, обеспечивающей образование замкнутого свода естественного равновесия над выработками;
- мощность налегающего (вышележащего) массива горных пород над основными технологическими выработками объекта должна быть не менее 15 м на равнинной местности и не менее 50 м на горноскладчатой;
- предельно длительная прочность пород должна обеспечивать устойчивость выработок в течение всего срока эксплуатации сооружения;
- общая площадь участка недр для размещения объекта должна быть в 2,5–3 раза больше расчетной полезной площади объекта;
- при размещении объектов в слоистых породах суммарная мощность ледяных прослоек в кровле выработок не должна превышать 15 % мощности всей непосредственной кровли;
- массив пород, выбранный для строительства подземного сооружения, эксплуатируемого при положительном тепловом режиме, должен быть сложен породами, не изменяющими прочностные свойства при протаивании в пределах зоны теплового влияния выработок.

2.6. Оценка потенциальных площадок для размещения АСММ в скальных породах при создании новых горнопромышленных предприятий в арктических регионах России

Ранее в главе 1 были рассмотрены области возможного применения АСММ для энергоснабжения потенциальных потребителей и объектов различного назначения. В настоящем разделе приводятся результаты предварительной оценки потенциальных площадок для размещения АСММ при создании новых горнопромышленных предприятий на примере редкометалльного месторождения Томтор в Якутии и медно-порфирового месторождения Песчанка на Чукотке.

2.6.1. Томторское месторождение ниобий-редкоземельных руд в Якутии

Комплексное редкометалльное месторождение Томтор находится на северо-западе Республики Саха (Якутия) в пределах Оленёкского улуса (района), в 400 км к югу от побережья моря Лаптевых. Географические координаты центра месторождения: 71°02' северной широты, 116°33' восточной долготы (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Расположение месторождения Томтор в Республике Саха (Якутия) [14–16]

Месторождение расположено на слабосхолмленной равнине с абсолютными отметками от 75 до 259 м и относительными превышениями до 80 м [15]. Общий вид местности в районе Томторского месторождения показан на рис. 2.9. Томтор представляет собой одно из крупнейших редкометалльных месторождений в мире, его прогнозные ресурсы составляют 154 млн т руды с содержанием оксидов ниобия — 6,71 %, иттрия — 0,6 %, скандия — 0,048 % и тербия — 9,53 %. По содержанию редкоземельных металлов оно уникально — это фактически готовый концентрат [18]. По мнению специалистов, на базе разведанных и утвержденных запасов сырья Томторского месторождения подготовлена к промышленному освоению крупная богатая минерально-сырьевая база ниобия и редких земель иттриевой группы, способная обеспечить потребность России на длительную перспективу [17, 19].

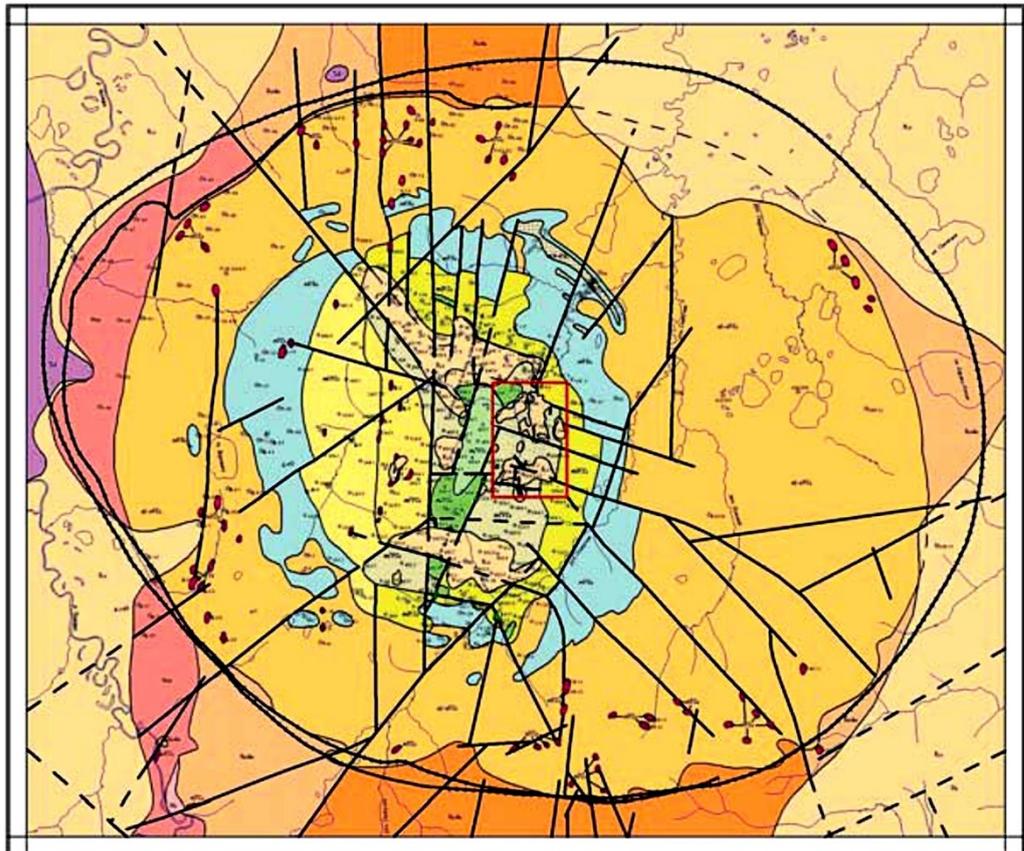


Рис. 2.9. Общий вид местности в районе месторождения Томтор [17]

Как отмечается в работе [20], комплексная оценка месторождения, базирующаяся на результатах технико-экономических расчетов отработки участка балансовых руд, показала рентабельность освоения месторождения.

Кратко рассмотрим основные характеристики месторождения, которые более детально приведены в работах [20–22].

Общие сведения о районе месторождения. Месторождение Томтор приурочено к одноименному массиву щелочных пород, ультрамафитов и карбонатитов, расположенному на западном склоне Уджинского поднятия. Породы представлены доломитами, сланцами и аргиллитами улахан-курунгской свиты рифея и терригенными метаморфизованными породами томторской свиты венда. Массив Томтор имеет в плане округлую, почти изометричную форму диаметром около 20 км и общей площадью порядка 250 км² (рис. 2.10).



(масштаб 1:150 000)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	Триасовая система. Нижний отдел. туфолововая толща. Туфы, лавы, платобазальты		Безрудная группа Карбонаты безрудные (кальциевые и доломит-кальциевые)
	Пермская система. Нижний-верхний отдел нерасчлененные. Конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, угли		Кальцит-микроклин-сплюснутые породы
	Венд. Томторская свита. Песчаники, гравелиты, алевролиты		Камафориты (кальцит-флогопит-магнетитовые породы)
	Верхняя подсвита. Доломиты, сланцы, алевролиты		Комплекс силикатных пород Щелочно-ультраосновные породы альнеит-тингваитовой серии (альнеиты, щелочные пикриты, тингваиты и др.)
	Нижняя подсвита. Доломиты, сланцы, алевролиты, песчаники		Щелочные и нефелиновые сиениты
ЭНДОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВА ТОМТОР			Фондолиты (нефелин-пироксеновые породы ряда якупирангит-уртит)
Карбонатитовый комплекс		ПРОЧИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	
Рудная группа			Геологические границы
	Карбонатитовые брекчии		Тектонические нарушения:
Редкометалльная подгруппа			а) достоверные;
	Карбонатиты редкометалльные (анкеритовые)		б) предполагаемые или погребенные
	Анкерит-тамозитовые породы		Границы массива Томтор:
Фосфорно-редкометалльная группа			а) по данным магниторазведки;
	Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные)		б) по данным гравиразведки
	Апатит-микроклин-сплюснутые породы		Контуры участка Буранный

Рис. 2.10. Схематическая геологическая карта массива Томтор [17, 19, 23]

Строение массива концентрическое, зональное, его центральная часть диаметром 4–5 км сложена породами карбонатитового комплекса, которые

являются субстратом рудоносных кор выветривания. Ультрамафиты и фойдолиты окаймляют карбонатитовое ядро с восточной и западной сторон в виде неполного кольца шириной 1,5–2,0 км.

Камафориты, серповидные тела шириной 300–400 м, окаймляют карбонатитовое ядро с восточной и западной стороны в виде неполного кольца шириной 1,5–2,0 км. Внешняя часть массива сложена щелочными и нефелиновыми сиенитами. Полный профиль кор выветривания обычно развивается на фосфорно-редкометалльных карбонатитах рудной группы и включает все четыре выделенных горизонта (сверху вниз): каолинит-крандаллитовый, сидеритовый, гетитовый и фран-колититовый, являющихся, по сути, природными типами руды.

Практический интерес представляет только первый тип руды. Руда этого типа, приуроченная к каолинит-крандаллитовому горизонту, является комплексной (редкометалльно-редкоземельной) и представляет собой новый геолого-промышленный тип месторождений, связанных с корами выветривания по карбонатитам.

Рудное тело приурочено к каолинит-крандаллитовому горизонту переотложенной коры выветривания, в большинстве случаев залегает на породах сидеритового горизонта и перекрывается осадочными образованиями перми, юры и четвертичного возраста общей мощностью от 7,5 до 160 м. Контакты с этими отложениями четкие, ровные или слабоизвилистые; кровля нередко несет следы размыва и переотложения. Очертания геологического контура геометрически неправильные, границы изогнутые, зачастую соподчиняются развитым элементам разломной тектоники.

В плане рудное тело имеет форму субгоризонтального пласта размером 2,6×1,4 км и вытянуто в меридиональном направлении. Границы его неправильные извилистые. Мощность рудного пласта изменяется от 0,2 м по периферии до 12–15 м, редко до 42 м в центральной части. Рудное тело располагается в монолитных и слегка рыхловатых слоистых (горизонтально-, волнисто- и косослоистых) алевропелитовых (до песчанистых разновидностей) породах с мощностью слойков 0,1–10 мм, сложенных главным образом минералами группы крандаллита, монацитом, пироксеном, оксидами титана, каолинитом, гидрослюдой, гетитом, гидрогетитом и сидеритом.

Рудный пласт представляет собой чередование прослоев, в разной степени обогащенных пироксеном, монацитом, и бедных крандаллитовых и каолинит-крандаллитовых прослоев, содержащих 1–2 % оксидов ниобия и до 3–5 % оксидов редких земель. Четкой зональности распределения прослоев по разрезу внутри месторождения не выявлено, но в целом отмечается некоторая приуроченность пироксеновых прослоев к центру и низам разреза. Контур рудного тела определяются опробованием и при бортовом содержании 1 % Nb₂O₅ весьма близки геологическим границам каолинит-крандаллитового горизонта.

Сейсмичность района. Следует отметить, что в Якутии более 1,5 млн км², или почти 50 % территории, являются сейсмоопасными. Карта сейсмического районирования территории Якутии [23] представлена на рис. 2.11.

В соответствии с требованиями «Норм проектирования сейсмостойких атомных станций» [24] атомная станция должна обеспечивать безопасность при сейсмических воздействиях МРЗ включительно и выработку (выдачу) энергетической продукции вплоть до уровня ПЗ включительно. На первой стадии ТЭО сейсмичность района для средних грунтов допускается принимать на основе комплекта карт ОСР-97, позволяющего оценивать степень сейсмической

опасности в средних грунтовых условиях для объектов разных сроков службы и категорий ответственности [25]. Согласно макросейсмическим данным, сейсмичность в районе месторождения Томтор оценивается в 5–6 баллов.

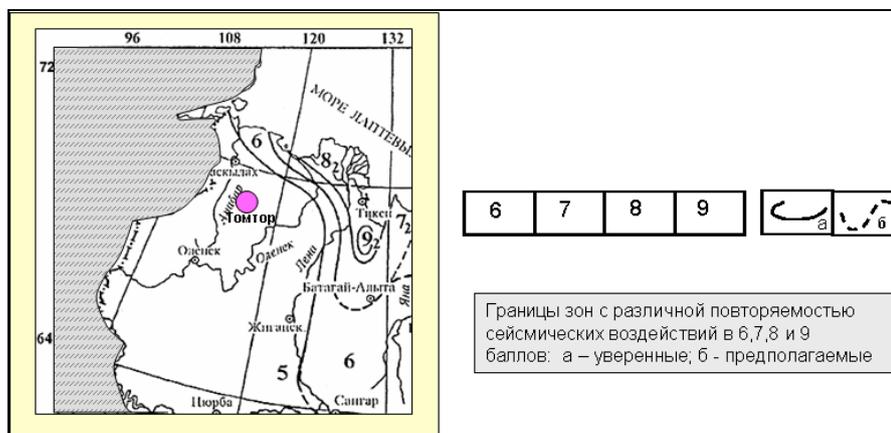


Рис. 2.11. Карта сейсмического районирования Якутии, 1996 г. [23]

Тектонические нарушения. Относительно простое строение и пологое залегание рудного пласта в ряде случаев осложнено довольно крутым падением его на склонах депрессий до $35\text{--}45^\circ$, а также тектоническими нарушениями сплошности слоя с удвоением и, в единичных случаях, утроением мощности. Карта с тектоническими нарушениями в районе участка Томтор представлена на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Карта с тектоническими нарушениями месторождения Томтор [17]

Характеристика многолетней мерзлоты. Многолетнемерзлые породы развиты в пределах района на глубину до 750 м, непосредственно в пределах

месторождения положение нижней границы мерзлой зоны варьирует в диапазоне от 165 до 414 м. Мощность слоя годовых колебаний температуры мерзлых пород составляет 9 м. Температура по подошве данного слоя изменяется от $-6,54$ до $-8,4$ °С. Ниже слоя наблюдается плавное увеличение температуры пород с глубиной. Геотермический градиент изменяется от 1,57 до 2,5 °С на 100 м [16].

Термокарсты. Согласно данным топографических карт, на участке месторождения зафиксировано большое количество термокарстов. Несколько термокарстов различной площади находятся в районе территории участка Буранный в пределах 0,8–1,5 км на северо-запад.

Размещение потенциальных площадок. Для сравнительной оценки в районе Томторского месторождения выбраны две площадки. Атомную станцию малой мощности целесообразно располагать непосредственно в районе с действующими или проектируемыми объектами, например, около подземного рудника или карьера для отработки месторождения. Схема размещения потенциальных площадок представлена на рис. 2.13.

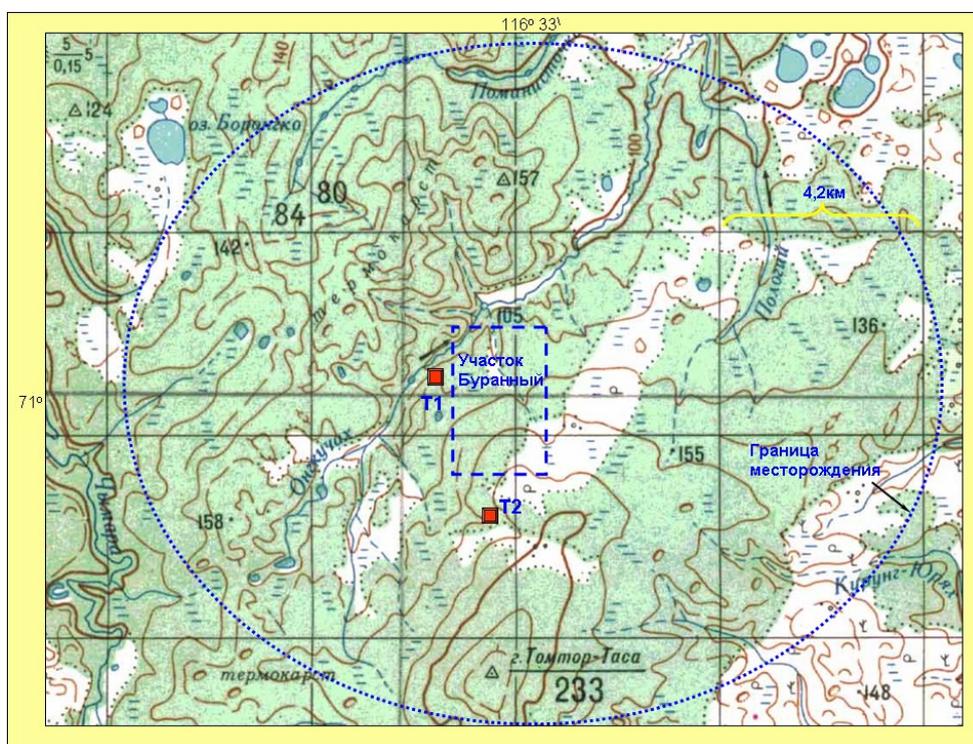


Рис. 2.13. Размещение потенциальных площадок АСММ на месторождении Томтор

В районе месторождения Томтор планируется рассмотреть следующие потенциальные площадки (на рис. 2.13 они выделены красным цветом):

- в зоне, прилегающей к участку Буранный, — площадка Т1 (карбонатитовый комплекс);
- в зоне, прилегающей к горе Томтор-Таса, — площадка Т2 (щелочные и нефелиновые сиениты).

Ранжирование потенциальных площадок

Для ранжирования площадок используются принятые в методике МАГАТЭ основные группы критериев, которые рассматривались ранее в разделе 2.1 и которые связаны с природными и социально-экономическими условиями. Первая категория содержит наиболее критичные с точки зрения безопасности показатели отбора при выборе площадки. Диапазон изменения баллов при ранжировании площадок колеблется от 1 до 8 (в среднем от 1 до 5). Наименьшее количество баллов соответствует самым неблагоприятным условиям. После того как каждый критерий с определенным по значимости весом будет применен к каждой площадке, рассчитывается общий итог ранжирования. В качестве приоритета выбирают критерии, чтобы числовые значения по рассматриваемым площадкам имели отличия. Так, например, из-за разных типов горных пород на прилегающей территории, стоимость строительства объекта будет несколько отличаться.

Обе площадки расположены на экономически депрессивной территории с отсутствующей инфраструктурой, равноудалены от ближайших населенных пунктов, имеют одинаковые географические и климатические характеристики, степень комплексной изученности и уровень сейсмичности территории.

Определение времени переноса радионуклидов из АСММ к реке. Рассматриваются воды сезонно-талого слоя и воды водотоков, протекающие в пределах массива Томтор, которые соответствуют ГОСТам на питьевую воду.

Таблица 2.5

Распределение баллов в зависимости от времени миграции радионуклидов

Время миграции	Баллы
Более 100 лет	5
75–100 лет	4
50–75 лет	3
25–50 лет	2
Менее 25 лет	1

Критерий учитывает только геологический барьер. Время миграции определяется как время, необходимое для того, чтобы определенное количество стабильного несорбирующегося трассера достигло биосферы при утечке его из станции, и принимается по аналогии с работой [26]. Для ранжирования площадок используется система баллов, приведенная в табл. 2.5.

Результаты оценки переноса радионуклидов из подземного комплекса АСММ представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Оценка переноса радионуклидов из подземного комплекса АСММ

Площадка	Характеристика	Баллы
Томтор 1 (Т1)	Породы карбонатитового комплекса перекрываются осадочными образованиями мощностью в среднем 48 м	2
Томтор 2 (Т2)	Осадочные образования 1–10 м. Скальные плотные породы, щелочные и нефелиновые сиениты	5

Сейсмичность и разломы. Высокая сейсмичность и вероятность разлома — неблагоприятные характеристики для места расположения объекта. Сейсмичность в районе месторождения Томтор по площадкам Т1 и Т2 оценивается одинаково в 5–6 баллов по шкале MSK-64. Рейтинг — 3 балла.

При наличии одного разлома длиной около 1 км на расстоянии менее 1 км от границ площадки количество баллов площадки равно 1. При отсутствии разломов длиной более 1 км на расстоянии менее 2 км от границ площадки количество баллов площадки равно 5. Оценка влияния разломов по площадкам представлена в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Оценка площадок по наличию геологических разломов

Площадка	Характеристика	Баллы
Томтор 1 (Т1)	2 разлома на расстоянии 0,5 км и длиной более 1 км	1
Томтор 2 (Т2)	1 разлом на расстоянии 5 км и длиной менее 1 км	5

Термокарсты. Критерий термокарст связан с риском того, что при изменении устойчивого состояния породного массива возможно влияние подземных вод на объект. При наличии термокарстов в пределах 1 км от границ площадки ей присваивается 1 балл. При отсутствии термокарстов на расстоянии менее 2 км от границ площадки количество баллов площадки равно 5. Оценка влияния термокарстов по площадкам показана в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Оценка влияния термокарстов по площадкам

Площадка	Характеристика	Баллы
Томтор 1 (Т1)	В пределах 0,8–1,5 км на северо-запад расположены три зоны термокарстов	2
Томтор 2 (Т2)	Ближайшее поле термокарстов в 4 км на юго-восток	5

Воздействие на окружающую среду, животный и растительный мир.

Риск нанесения ущерба большей части растительной среды или уничтожения редких видов животного мира вследствие размещения объекта на территории возможен. Предполагается, что при строительстве и эксплуатации степень влияния АСММ на окружающую среду (животный и растительный мир) по площадкам Т1 и Т2 будет неодинаковой. Поверхность Т1 покрыта редким смешанным лесом различной плотности, площадка Т2 преимущественно расположена в тундровой зоне.

Выделим следующие возможные виды воздействия при строительстве и эксплуатации АСММ:

- доступ и отчуждение территории при строительстве, изменение на прилегающей территории статуса дикой природы;
- изменение территории распространения каких-либо видов флоры или фауны;
- риск гибели одного или нескольких видов редких животных или растений;
- в процессе эксплуатации атомной станции при сбросе водозаборных вод в ближайшие реки или озера возможна потеря качества и количества рыбного ресурса.

Среда обитания диких животных и растений, в силу чувствительности и слабой развитости, более подвержена к изменениям в тундровой зоне. Поэтому площадка Т2 считается менее предпочтительной даже при наличии одного отрицательного последствия. Возможная деструкция растительности и мест обитания животных определяется в соответствии с табл. 2.9, результаты оценки соответствия площадок этому критерию приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.9

Оценка воздействия на растительность и места обитания животных

Отношение к ООПТ	Деструкция растительности и мест обитания животных		
	Общей среды обитания одного вида диких животных или растений может быть разрушено		Один редкий вид диких животных или растений мог бы погибнуть
	< 10 %	> 10 %	
Строительство и эксплуатация не скажется на ООПТ	5	3	2
Будет значимое воздействие на ООПТ	3	2	1

Таблица 2.10

Оценка деструкции растительности и мест обитания животных по площадкам

Площадка	Характеристика	Баллы
Томтор 1 (Т1)	Один редкий вид диких животных или растений мог бы погибнуть	2
Томтор 2 (Т2)	Более 10 % общей среды обитания одного вида диких животных или растений может быть разрушено	3

Оценка биологического воздействия подземной станции выполнена по балльной шкале, приведенной в табл. 2.3. Это шкала кратко- и долгосрочных воздействий, которые могли бы возникнуть в результате строительства и эксплуатации выбираемой площадки. Итоги оценки по площадкам представлены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Оценка биологического воздействия по площадкам

Площадка	Характеристика	Баллы
Томтор 1 (Т1)	Полная потеря 0,25 км ² спелого леса или потеря 50 % крупных диких животных и/или 50 % увлажненных земель, и/или потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения	2
Томтор 2 (Т2)	Полная потеря 0,25 км ² земель, которые на 75 % имеют пустынный характер и на 25 % заняты лесом, и/или потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения	3

Географические и климатологические критерии. Ожидаемыми последствиями возможного изменения климата могут быть подъем уровня подземных вод и повышение уровня воды в реках, что может оказать существенное влияние на снижение уровня безопасности АСММ. Уровни отметок поверхности площадок различаются на 70 м. При этом площадка Т1 находится примерно на одном уровне (небольшое превышение 5–10 м) с самым высоким уровнем воды в ближайших реках. С учетом этих особенностей площадки оцениваются следующим образом: Т1 — 2 балла, Т2 — 5 баллов.

Технико-экономические оценки площадок. Наличие разных типов пород на рассматриваемых площадках обуславливает различный объем капитальных затрат на строительство подземного комплекса, связанных с экскавацией пород. По экспертным оценкам авторов, затраты на выемку грунта массива скальных пород будут на 20 % выше по сравнению с осадочными породами. Оценка этих затрат и соответствующие им баллы по рассматриваемым площадкам приведены в табл. 2.12. Итоговая оценка площадок в баллах, по результатам которой наиболее предпочтительной признана площадка Томтор 2, приведена в табл. 2.13.

Таблица 2.12

Оценка капитальных затрат на строительство подземных комплексов

Площадки	Характеристика критерия	Затраты, %	Баллы
Томтор 1 (Т1)	Экскавация породы при строительстве подземного комплекса в осадочных породах мощностью до 20 м	100	5
Томтор 2 (Т2)	Экскавация породы при строительстве подземного комплекса в осадочных породах мощностью до 5 м и скальных породах	120	3

Таблица 2.13

Итоговая оценка площадок на Томторском месторождении, балл

Показатель	Вес, %	Томтор 1	Томтор 2
Перенос радионуклидов из АСММ	20	2	5
Сейсмичность в районе	20	3	3
Влияние геологических разломов	15	1	5
Влияние термокарстов	10	2	5
Деструкция растительности и районов обитания биологических видов	5	2	3
Потеря территории или районов обитания биологических видов	15	2	3
Климатические изменения (повышение уровня воды в реках)	5	2	5
Капитальные затраты на строительство подземного комплекса	10	5	3
Количество баллов с учетом веса показателей		235	400

2.6.2. Медно-порфировое месторождение Песчанка на Чукотке

Месторождение Песчанка — наиболее крупное комплексное коренное медно-порфировое месторождение в пределах Билибинского района Чукотского автономного округа — располагается в западной части Чукотского региона в долине реки Песчанка, входящей в систему левых притоков р. Большой Анюй в 200 км юго-западнее г. Билибино (рис. 2.14). Географические координаты центра месторождения: 66°34' северной широты, 164°28' восточной долготы [27].

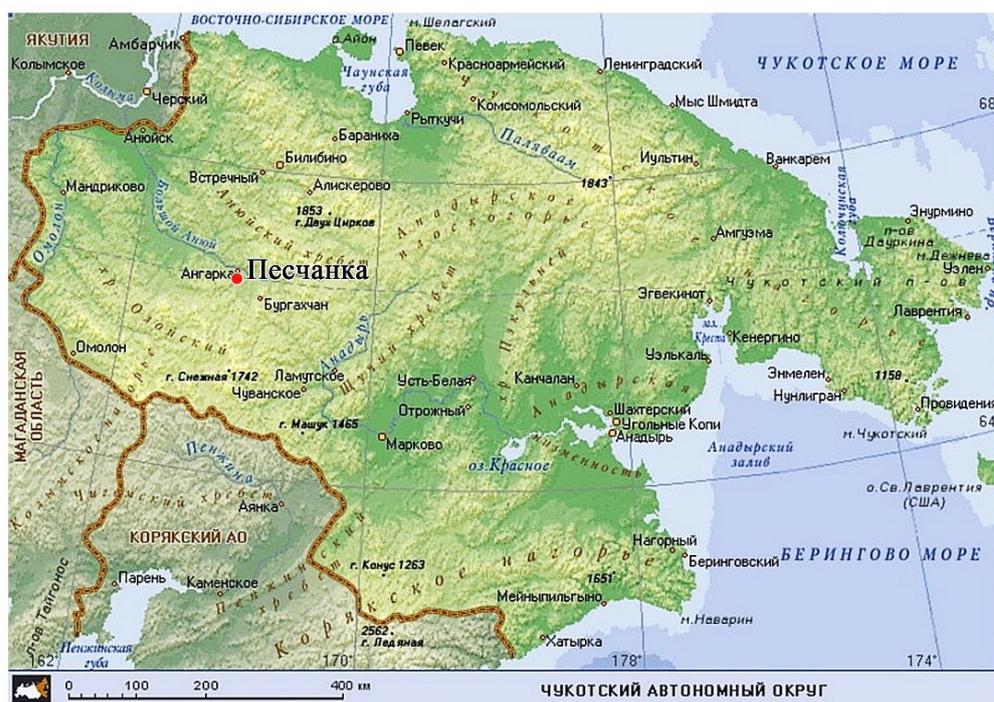
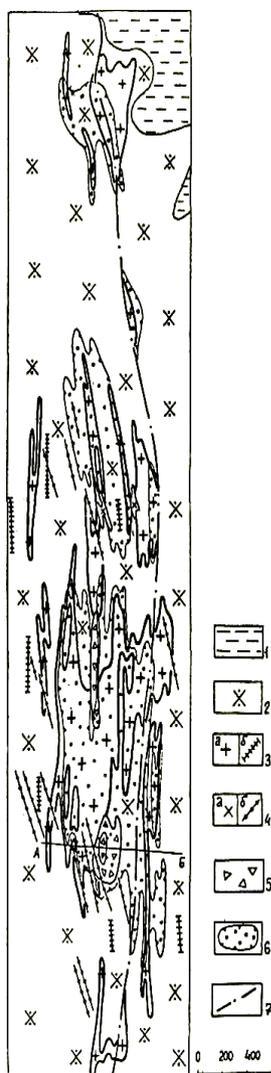


Рис. 2.14. Расположение месторождения Песчанка на Чукотке [27]

Баимский рудный район, кроме рассматриваемого месторождения, включает также медно-порфировое месторождение Находка, серию рудопроявлений, предположительно медно-порфирового рудноформационного типа (Лучик, Егдэгкыч, 3-й Весенний и др.), а также ряд золото-кварцевых и золото-серебросодержащих кварц-карбонат-полиметаллических рудопроявлений неясной рудноформационной принадлежности [28].

Месторождение Песчанка находится в юго-восточной краевой части крупного полифазного Екдэгкычского плутона рудоносной формации, расположенного в центре восточной ветви пояса. Биотит-пироксеновые габбро и габбро-диориты слагают западную часть плутона, а монцодиориты, кварцевые монзониты и монзониты — восточную. Контакт плутона с вмещающими ороговикованными ранневожскими вулканогенно-осадочными образованиями, представленными туфами дацитов и андезитов, базальтами, андезит-базальтами, андезитами, алевролитами и туфопесчаниками, имеет близкую к прямолинейной

форму и субмеридиональное направление. Площадь рудного поля составляет около 22 км² и охватывает эндоконтактовую зону массива. Вертикальный размах оруденения составляет 750 м. Всего выявлено 4 штокерковых рудных тела площадью 0,1–2,61 км². Вдоль них проходит зона крутопадающих разрывных нарушений (Песчанковский разлом) (рис. 2.15).



Центральную часть месторождения занимает вытянутое в меридиональном направлении тело кварцевых монцит-гранодиорит-порфиров. Это шток длиной около 6 км при ширине 0,3–0,8 км, по восстанию и простирацию который расщепляется на ряд апофиз различной мощности и протяженности. Падение штока и апофиз восточное — 50–70°. Рельеф его кровли сложен, характеризуется многочисленными выступами и погружениями разной амплитуды. В центральной и южной частях месторождения распространены неравномерно-зернистые до порфировидных кварцсодержащие монциты и монцодиориты, а в северной и северо-западных частях — равномерно-зернистые лейкократовые кварцевые монциты и монцодиориты.

Западный фас месторождения сложен слабокальцифицированными габбро, габбро-диоритами и диоритами первой фазы внедрения [29, 30].

Прожилково-вкрапленное оруденение (прожилки и вкрапленность развиты примерно в одинаковых пропорциях) охватывает тело монцит-гранодиорит-порфиров, распространяясь во вмещающие породы на десятки метров. При этом контур оруденения полностью повторяет конфигурацию порфирового штока. Поэтому рудное тело имеет сложную, в первом приближении пластинообразную форму с падением на восток.

Рис. 2.15. Схематическая геологическая карта месторождения Песчанка [29]:

1 — алевриты, песчаники, конгломераты нижнемелового возраста; образования рудоносного интрузивного комплекса; 2 — монциты, кварцевые монциты, монцодиориты; 3 — кварцевые монцит-порфиры (а — пластинчатые тела, б — дайки); 4 — диориты, диоритовые порфиры (а — штоки, б — дайки); 5 — участки интенсивного брекчирования и штокеркового окварцевания («кварцевые ядра»); 6 — контуры рудных тел по принятому бортовому содержанию меди (0,3 %); 7 — Песчанковский разлом

Рудное поле фиксируется комплексными высококонтрастными концентрическими (по составу и концентрациям) первичными и вторичными геохимическими ореолами элементов-индикаторов медно-молибден-порфирового оруденения. Первичный комплексный ореол рассеяния Песчанкинского рудного поля (Cu, Mo, Pb, Au и др.) в целом представляет собой концентрически зональную комплексную аномалию (6×0,6×1 км), повторяющую очертания минерализованной зоны рудного поля. Во вторичных ореолах рассеяния внутренние зоны медно-порфировой рудно-магматической системы формируются концентрически зональными комплексными аномалиями, определяющими минерализованные зоны месторождения. В целом рудные поля, включая их периферические зоны, четко фиксируются ореолами повышенных относительно фона значений концентрации меди (для Песчанкинского рудного поля протяженность такого ореола более 8 км при ширине до 2,5 км) [31].

Промышленные рудные тела, оконтуренные по бортовому содержанию 0,3 % меди, со средними содержаниями меди 0,56 %, молибдена — 0,013 %, золота — 0,3 г/т, обрамляются минерализованными зонами мощностью 100–200 м с постепенным понижением содержания меди от границ рудных тел к периферии зон до 0,10–0,05 %.

На периферии месторождения проявляются отдельные кварцевые и кварц-карбонатные жилы, зоны окварцевания и карбонатизации с полиметаллической и золоторудной минерализацией.

Оруденение приурочено к штоку кварцевых монзонит-гранодиорит-порфиров, который характеризуется сложным рельефом кровли. В висячем контакте рудоносного штока выявлены трубообразные тела окварцованных брекчий. Конгломераты и гравелиты раннего мела, перекрывающие плутон, содержат обломки монзонитонидов со следами гидротермального изменения и халькопирит — с проявлениями весьма специфичной борнитовой минерализации. Прожилково-вкрапленное оруденение охватывает тело порфиров и распространяется во вмещающие породы на десятки метров. Рудное тело повторяет конфигурацию штока и характеризуется сложными очертаниями благодаря многочисленным апофизам, пережигам и т. д.

На рис. 2.16 и 2.17 приведены характерные природные ландшафты различных участков месторождения Песчанка, на основании которых можно сделать вывод как о предпочтительном штольневом варианте размещения подземного комплекса.

Ранжированию подлежат две площадки штольневого способа размещения АСММ (П1 и П2), расположенные в различных геологических формациях. Выбор мест размещения площадок под строительство АСММ основывается на ранжировании площадок с учетом как зарубежного, так и незначительного отечественного практического опыта, в частности, при выборе мест расположения радиационно опасных объектов [33–35]. Для ранжирования площадок на месторождении Песчанка, аналогично Томторскому месторождению, используются критерии МАГАТЭ.

С точки зрения безопасности определяющими при выборе площадки являются критерии, связанные с природными условиями. Поэтому рассмотрим эти критерии более подробно.



Рис. 2.16. Геолого-разведочные работы на месторождении Песчанка [32]



Рис. 2.17. Географический ландшафт в окрестностях месторождения Песчанка [32]

Месторасположение месторождения Песчанка и предлагаемые площадки размещения АСММ показаны на рис. 2.18.

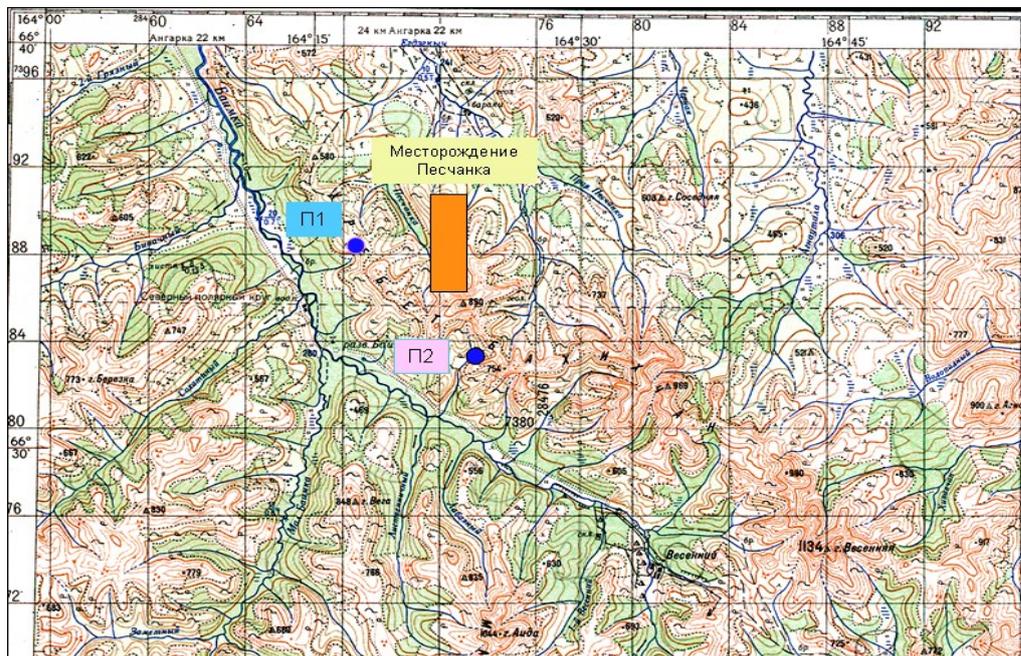


Рис. 2.18. Предлагаемые площадки АСММ на месторождение Песчанка

Гидрогеологические критерии. Определяется время переноса радионуклидов из подземного комплекса АСММ к ближайшему водному источнику. Рассматриваются водные источники, протекающие вблизи месторождения Песчанка, которые соответствуют ГОСТам на питьевую воду. Оценочная характеристика переноса радионуклидов из подземной АСММ, которая определялась в соответствии с табл. 2.5, приведена в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Оценка переноса радионуклидов из АСММ

Площадка	Характеристика массива	Баллы
Песчанка 1 (П1)	Кварцевые монцониты	5
Песчанка 2 (П2)	Вулканогенные андезиты	4

Сейсмичность для рассматриваемых площадок, в отсутствие данных по сейсмическому микрорайонированию, принимается одинаковой: 5 баллов для ПЗ и 6 баллов для МРЗ по шкале MSK-64 в соответствии с комплектом карт ОСР-97.

Наличие геологических разломов. Как и для месторождения Томтор, оценка площадок выполнялась с учетом следующих граничных условий: при наличии одного разлома длиной около 1 км на расстоянии менее 1 км от границ площадки количество баллов площадки равно 1; при отсутствии

разломов длиной более 1 км на расстоянии менее 2 км от границ площадки количество баллов площадки равно 5. Оценка влияния разломов по площадкам представлена в табл. 2.15.

Таблица 2.15

Оценка площадок по наличию геологических разломов

Площадка	Характеристика разломов	Баллы
Песчанка 1 (П1)	1 разлом длиной менее 1 км на расстоянии 5 км	5
Песчанка 2 (П2)	1 разлом длиной более 1 км на расстоянии 1 км	2

Наличие термокарстов. По аналогии с Томторским месторождением для оценки площадок по этому критерию принимаются следующие условия:

- при наличии термокарстов в пределах 1 км от границ площадки количество баллов площадки равно 1;
- при отсутствии термокарстов на расстоянии менее 2 км от границ площадки количество баллов площадки составляет 5.

Оценка влияния термокарстов по площадкам показана в табл. 2.16.

Воздействие на окружающую среду, животный и растительный мир.

Ранжирование площадок по данному критерию проводится на основе анализа и оценки факторов влияния АСММ на животный и растительный мир в соответствии с табл. 2.3 и 2.11. При этом, учитывая идентичность природной среды (площадки покрыты редким смешанным лесом различной плотности), предполагается, что влияние АСММ на места обитания животных по площадкам П1 и П2 будет практически одинаковым. Результаты оценки площадок П1 и П2 с учетом деструкции растительности и мест обитания животных приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.16

Оценка влияния термокарстов по площадкам

Площадка	Наличие термокарстов	Баллы
Песчанка 1 (П1)	На расстоянии 1,5–2,0 км две зоны термокарстов	3
Песчанка 2 (П2)	Ближайшая зона термокарстов на расстоянии более 2 км	5

Таблица 2.17

Оценка деструкции растительности и мест обитания животных по площадкам

Площадка	Характеристика	Баллы
Песчанка 1 (П1)	Более 10 % общей среды обитания одного вида диких животных или одного вида растений может быть разрушено	3
Песчанка 2 (П2)	Более 10 % общей среды обитания одного вида диких животных или одного вида растений может быть разрушено	3

Результаты оценки биологического воздействия по площадкам с учетом потерь территории или районов обитания биологических видов, которые могут проявиться при строительстве и эксплуатации АС, показаны в табл. 2.18.

Таблица 2.18

Оценка биологического воздействия по площадкам

Площадка	Характеристика	Баллы
Песчанка 1 (П1)	Полная потеря 0,2 км ² спелого леса или потеря 50 % крупных диких животных и/или 50 % увлажненных земель	3
Песчанка 2 (П2)	Полная потеря 0,2 км ² спелого леса или потеря 50 % крупных диких животных и/или потеря районов обитания биологических видов, находящихся под угрозой исчезновения	2

Географические и климатологические критерии.

Уровень расположения выработок доступа на площадках относительно уровня воды в реках составляет примерно 100 м для площадки П1 и около 70 м для площадки П2. С учетом этих особенностей площадкам присваивается следующее количество баллов: П1 — 4 балла, П2 — 3 балла.

Технико-экономические оценки потенциальных площадок. Информация о капитальных затратах на строительство подземного комплекса в скальных и осадочных породах (по статье затрат — экскавация пород) приведена в табл. 2.19.

Итоговая оценка площадок в баллах приведена в табл. 2.20. Наиболее предпочтительной (435 баллов) признана площадка Песчанка 1.

Таблица 2.19

Оценка капитальных затрат на строительство подземных комплексов

Площадка	Характеристика критерия	Капитальные затраты, %	Баллы
Песчанка 1 (П1)	Экскавация породы при строительстве подземного комплекса в скальных и осадочных породах	100	5
Песчанка 2 (П2)	Экскавация породы при строительстве подземного комплекса в скальных породах	120	4

Таблица 2.20

Итоговая оценка площадок в баллах

Показатель	Вес, %	Песчанка 1	Песчанка 2
Перенос радионуклидов из АСММ	20	5	4
Сейсмичность в районе	20	5	5

Показатель	Вес, %	Песчанка 1	Песчанка 2
Влияние геологических разломов	15	5	2
Влияние термокарстов	10	3	5
Деструкция растительности и районов обитания биологических видов	5	3	3
Потеря территории или районов обитания биологических видов	15	3	2
Климатические изменения (повышение уровня воды в реках)	5	4	3
Капитальные затраты на строительство подземного комплекса	10	5	4
Количество баллов с учетом веса показателей		435	360

Выводы по главе 2

Рассмотрены и обобщены основные принципы по выбору площадок для строительства объектов атомной промышленности. В рекомендациях МАГАТЭ по выбору площадки каждому государству предлагается разработать (с использованием своей специфики) свою нормативно-правовую и нормативно-техническую документацию, определяющую критерии, условия, порядок и глубину исследований, достаточных для выбора площадки для размещения радиационно опасных объектов.

Выявлена первостепенность задачи выбора площадки для размещения АСММ, решение которой направлено на оценку предпочтительности одной площадки по отношению к другой с учетом множества факторов. Несмотря на имеющиеся и признанные международным сообществом рекомендации относительно выбора площадок для подземных радиационно опасных объектов, типовая методология такого выбора до настоящего времени не разработана.

Сформулирован основной подход, при котором методология выбора площадок и рекомендованные критерии частично могут быть использованы в качестве аналогов для создания нормативно-правовой документации при выборе площадок под размещения АСММ.

Площадка считается пригодной для размещения АС, если имеется возможность обеспечить ее безопасную эксплуатацию с учетом процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения. При этом должна обеспечиваться безопасность населения и защита окружающей среды от радиационных воздействий при нормальной эксплуатации и проектных авариях.

Показано, что при выборе площадки очень важно установить природные факторы, которые при эксплуатации атомной станции могут повлиять как на безопасность самого ядерного объекта, так и на прилегающие территории. Влияние места размещения связано со многими характеристиками природной и техногенной среды, например: сейсмотектоническими, геофизическими, инженерно-геологическими, гидрологическими, экологическими и радиологическими факторами, условиями землепользования и рядом других. Таким образом, выбор

места размещения является многофакторной задачей и окончательное заключение может быть сделано только после анализа всех характеристик и технико-экономической оценки.

Разработана методика оценки потенциальных площадок на основе набора критериев, сформированных в соответствии с действующими российскими и международными документами. Особое значение в процедуре выбора площадок занимает их ранжирование, целью которого в конечном итоге является обоснованный выбор места строительства АСММ в труднодоступных регионах России.

Общий алгоритм выбора площадки для подземной АСММ включает несколько этапов. На первом этапе заказчиком выбирается представляющий интерес район, который определяется в том числе и соображениями близости к потребителю.

На этапе идентификации подбирают несколько приемлемых площадок и последовательно проводят их сравнение с ограничивающими критериями (запрещающими и неблагоприятными для размещения). Для дальнейшего анализа площадок производят сбор данных по площадкам.

На последующих этапах обосновываются существенные критерии для данного района и выполняется оценка воздействий энергетического объекта, определяется приемлемость последствий каждого воздействия и дается оценка вероятности воздействий.

Окончательная оценка предварительно выбранных площадок выполняется посредством многофакторного анализа. Анализ и сравнение возможных площадок производят путем ранжирования и технико-экономического сравнения. Выбор и утверждение наиболее предпочтительной площадки происходит на последнем этапе.

Рассмотрены перспективные месторождения полезных ископаемых в удаленных и труднодоступных регионах России, освоение которых требует создания автономных источников энергообеспечения, позволяющих обеспечить энергетическую безопасность горнопромышленных предприятий и объектов социальной сферы:

- Томторское месторождение ниобий-редкоземельных руд в Якутии;
- медно-порфириное месторождение Песчанка на Чукотке.

На примере ранжирования потенциальных площадок на этих месторождениях по природным и социально-экономическим критериям предварительно определены наиболее приемлемые участки для размещения АСММ. Результаты исследований по выбору конкретных площадок на труднодоступных территориях позволили сделать вывод о том, что на месторождении Томтор наиболее пригодно заглобленное (котлованное) размещение АСММ, в то время как на месторождении Песчанка выбрана площадка для штольневой располнения энергетического объекта.

Литература к главе 2

1. Методология выбора площадки под строительство АЭС. Текст : электронный. URL: http://knowledge.allbest.ru/physics/2c0a65625b2bc68b5c43b89421206c27_0.html (дата обращения: 05. 03.2018).
2. Работа по выбору площадки для строительства АЭС должна завершиться до конца года. Текст : электронный. URL: <http://www.hata.by/news/>

rabota_po_vyboru_ploschadki_dlya_stroitelstva_aes_dolzha_zavershitsya_do_k
onca_goda-828/ (дата обращения: 06.03.2018).

3. Узуньян, Ж. Геологическое захоронение долгоживущих РАО во Франции / Ж. Узуньян // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2001. № 1. С. 41–45.
4. Оценка площадок для ядерных установок. № NS-R-3. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Требования по безопасности. Вена : МАГАТЭ, 2010. 33 с.
5. СППНАЭ-93. Основные требования к разработке технико-экономического обоснования строительства атомной станции. Положение о порядке выбора площадки строительства. Москва : Атомэнергопроект, 2000. 110 с.
6. Кини, Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений / Р. Кини ; [перевод с английского]. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
7. НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Москва : Госатомнадзор, 1998. 38 с.
8. ПНАЭ Г-05-035-94. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты. Москва, 2000. 45 с.
9. РД-06-28-93. Правила безопасности при строительстве и горнотехнической эксплуатации размещаемых в недрах объектов. Москва : Госгортехнадзор, 1994. 6 с.
10. НП 032-01. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. Москва : Госатомнадзор, 2002. 6 с.
11. НП 050-03. Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. Москва : Госатомнадзор, 2003. 12 с.
12. Буданов, И. А. Выбор площадки для глубинного захоронения высокоактивных РАО / И. А. Буданов. Текст : электронный. URL: <http://www.slideshare.net/budanivan/ss-13269425> (дата обращения: 14.03.2018).
13. ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия). Подземные объекты в горных выработках криолитозоны. Якутск : Минстрой РС (Я), 2003. 10 с.
14. Кузьмин, Г. П. Подземные сооружения в криолитозоне / Г. П. Кузьмин. Новосибирск : Наука, 2002. 176 с.
15. Похиленко, Н. П. Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд / Н. П. Похиленко, А. В. Толстов // ЭКО: Всероссийский экономический журнал. 2012. № 11 (461). С. 17–27.
16. Месторождение Томтор, Якутия. Текст : электронный. URL: <http://tdm96.ru/?p=826> (дата обращения: 15.02.2018).
17. Толстов, А. В. Массив Томтор — крупнейший из «редких» / А. В. Толстов. Текст : электронный. URL: <http://st-yak.narod.ru/pdf/21-3.pdf> (дата обращения: 15.02.2018).
18. Томтор — начнется ли освоение? Текст : электронный. URL: <http://lanthanide.ru/node/2> (дата обращения: 15.02.2018).
19. Ковалев, Л. Н. Проблемы минерально-сырьевого комплекса в Республике Саха (Якутия) / Л. Н. Ковалев, Г. Г. Наумов, Р. Г. Неустроев // Горный журнал. 2006. № 3. С. 46–52.
20. Толстов, А. В. Комплексная оценка Томторского месторождения / А. В. Толстов, А. П. Гунин // Вестник Воронеж. ун-та. Геология. 2001. Вып. 11. С. 144–160.
21. Промышленные типы месторождений в карбонатитовых комплексах Якутии / А. В. Толстов [и др.]. Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1995. 168 с.

22. Толстов, А. В. Проблемы геолого-экономической оценки Томторского месторождения / А. В. Толстов // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов в XXI веке : тез. докл. Междунар. симпозиума, 5–9 октября 1998 г., Москва / под редакцией Л. З. Быховского. Москва : Геоинформмарк, 1998. С. 135–137.
23. Строительство в сейсмических районах. ТСН 22-301-97. Республика Саха (Якутия) к СНиП II-7-81. Текст : электронный. URL: www.rmnt.ru/docs/cat_tsn/26380.htm (дата обращения: 27.10.2018).
24. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. Текст : электронный. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035149> (дата обращения: 26.10.2018).
25. Уломов, В. И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина. Москва : ОИФЗ, 1999. 57 с. Текст : электронный. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/p/explanatory-notes-ocp-97.pdf> (дата обращения: 17.12.2018).
26. Сайда-Губа. Инженерно-геологические и инженерные исследования при строительстве объектов кондиционирования и долговременного хранения радиоактивных отходов ВМФ / В. П. Конухин [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2014. 289 с.
27. Карта Чукотского автономного округа. Текст : электронный. URL: <http://900igr.net/datas/geografija/JAkutija/0021-021-JAkutija.jpg> (дата обращения: 03.06.2014).
28. Месторождения металлических полезных ископаемых / В. В. Авдонин [и др.]. Москва : Академический проект-Трикта, 2005. 720 с.
29. Мигачев, И. Ф. Медно-порфировое месторождение Песчанка / И. Ф. Мигачев, М. М. Гирфанов, В. Б. Шишаков // Руды и металлы. 1995. № 3. С. 48–58.
30. Выделение и оконтуривание металлогенических таксонов (применительно к цветным и благородным металлам). Текст : электронный. URL: <http://www.tsnigri.ru/?q=node/61> (дата обращения: 03.03.2018).
31. Огородников, А. А. Состояние и развитие минерально-сырьевой базы Чукотского автономного округа / А. А. Огородников // Глобус. Геология и бизнес. 2012. № 3 (22). С. 14–18. Текст : электронный. URL: http://vnedra.ru/journals/globus_3_22.pdf (дата обращения: 03.03.2018).
32. Золотодобывающие компании Чукотки. ООО «ГДК Баимская». Текст : электронный. URL: http://www.eruda.ru/job/au/chukotka_job/baimskaya_job.htm (дата обращения: 16.03.2018).
33. Legal and institutional issues of transportable nuclear power plants: a preliminary study. Nuclear Energy Series IAEA No. NG-T-3.5 = Законодательные и ведомственные вопросы транспортабельных ядерных энергетических установок: предварительные исследования. Серия: Атомная энергия / МАГАТЭ. № NG-T-3.5. Вена : МАГАТЭ, 2013. 111 с.
34. Требования к расположению АЭС. Текст : электронный. URL: http://map1.msk.ru/map949892_0_0.htm (дата обращения: 20.03.2018).
35. Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России : в 2 частях. Ч. II / Н. Н. Мельников [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2003. 209 с.

Глава 3

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ АСММ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В ходе выполнения исследований по ранжированию видов взаимодействия подземной АСММ с окружающей средой в режиме нормальной эксплуатации авторами было продемонстрировано [1] следующее:

- для выполнения оценок по воздействию подземной АСММ на окружающую среду необходима максимально полная информация как о проекте подземной АСММ (реакторная установка, генераторы, турбины, конденсаторы и др.), так и относительно параметров, характеризующих непосредственно площадку размещения объекта (инженерно-геологические, тектонические, гидрологические, природно-климатологические и др.). Во всяком случае, подготовка документа уровня ОВОС предполагает именно такую постановку;

- поскольку на текущей стадии исследований подробная информация отсутствует, приходится ограничиваться видами взаимодействия, которые можно оценить на основе общих (эскизных) сведений о проекте подземной станции и регионе размещения объекта.

Для экспертного, в основном качественного, ранжирования видов взаимодействия подземной АСММ, размещаемой в скальных породах в условиях криолитозоны, предлагается ориентироваться на следующие критерии:

- авторитетные мнения специалистов в области атомной энергетики [2–10] и инженерной геоэкологии [11–27];
- значения коэффициентов экологической весомости по долговременному техногенному воздействию промышленных предприятий на компоненты геосферы [19];
- полнота исходной информации;
- наличие апробированных методических подходов.

С учетом сказанного наиболее важным и интересным представляется исследование теплового взаимодействия, которое может быть разбито на две подзадачи. Первая связана с тепловым воздействием на вмещающий массив в условиях криолитозоны, вторая — с воздействием на поверхностную окружающую среду (в первую очередь, гидросферу).

При этом следует отметить, что возможности оценки теплового воздействия достаточно слабо привязаны к особенностям конкретной реакторной установки и проекту подземной станции. Так, для подзадачи «Оценка теплового воздействия АСММ на водоем-охладитель в арктических условиях», на взгляд авторов монографии, достаточно знания тепловой мощности и коэффициента полезного действия реакторной установки, для подзадачи «Тепловое воздействие подземной АСММ на вмещающий массив многолетнемерзлых пород» необходимо знать геометрические характеристики подземных выработок для размещения АСММ и температуры внутренних помещений объекта, которые определяются нормативными требованиями. Все указанные параметры могут быть проварьированы в широком диапазоне значений, что весьма важно на выполненной стадии исследований.

Безусловный интерес представляет задача, связанная с оценкой радиационного загрязнения площадки станции и радиологического воздействия на население при аварийных выбросах.

3.1. Тепловое взаимодействие подземной АСММ с вмещающим массивом многолетнемерзлых пород

Как отмечалось ранее (глава 1), наиболее вероятным местом размещения АСММ называются отдаленные районы Крайнего Севера, которые характеризуются суровыми климатическими условиями и наличием мощной толщи многолетнемерзлых пород. Естественно, что в указанных условиях размещения объекта методология исследований теплового состояния вмещающего массива должна принять во внимание фазовый переход «лед — вода». Для решения поставленной задачи авторы апробировали некоторые инженерные подходы, применяемые при создании промышленных объектов в условиях вечной мерзлоты, а также применили аккуратные численные методы решения задач теплопроводности с учетом фазовых превращений. Рассматриваемая тепловая задача относится исключительно к сценарию нормальной эксплуатации.

Исследованиями тепловых процессов в ММГП занимались многие ученые, а также инженеры-строители, непосредственно связанные с созданием объектов различного назначения в сложных климатических условиях районов Крайнего Севера. Напомним некоторые имена российских исследователей, оставившие заметный вклад в решение обсуждаемого вопроса: П. И. Мельников, С. С. Вялов, К. Ф. Войтковский, А. А. Коновалов, Г. В. Порхаев, Н. С. Иванов, Г. М. Фельдман, Е. Д. Ершов, Л. Н. Хрусталева, Р. Я. Демченко, И. К. Расстегаев, А. С. Курилко, Ю. А. Хохолов и др. [28–52].

Понимая, что аккуратные физические результаты можно получить на основе численного решения уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода «лед — вода», тем не менее достаточно часто в своих исследованиях ряд указанных выше авторов основной упор делали на разработку инженерных методик расчетов тепловых полей в ММГП. Несомненно, они внесли существенный вклад в развитие инженерных подходов, реализуемых на практике и вошедших в СНиПы и ГОСТы.

Полученные знания по заданию граничных условий на поверхности ММГП в ходе знакомства и освоения инженерных подходов использовались авторами монографии при реализации численных методов решения уравнения теплопроводности с учетом фазовых превращений.

Подробное изложение методического подхода, используемого авторами при численном решении рассматриваемой тепловой задачи с учетом фазового перехода «лед — вода», приведено в работах [53–60].

На этапе подготовки к запланированным исследованиям были проведены оценки возможностей доступных программных продуктов: COMSOL (опция Conduction in Porous Media), PORFLOW (модель J. A. Wheeler), собственная программа, адаптированная для оценки воздействия АСММ на вмещающие породы в условиях вечной мерзлоты. Сравнительный анализ результатов тестовых расчетов, выполненных посредством указанных программ, показал приемлемую сходимость расчетных данных [61]. Однако именно COMSOL позволяет быстро и эффективно отображать расчетную информацию в удобной

графической форме. Физическая модель рассмотренных программных продуктов построена на общепринятых допущениях, о которых точно написано в статье А. Н. Казакова с соавторами [62]: окружающая среда предполагается макроскопически однородной по всем характеристикам, причем ее поровое пространство заполнено льдом, а после фазового перехода — водой; не учитывается зависимость теплофизических свойств горного массива от температуры как в мерзлом, так и в талом состоянии.

Поскольку основные природные параметры, используемые при численном решении тепловых задач (геотермический градиент, граница глубины сезонных колебаний, мощность ММГП, среднегодовая температура воздуха) для районов потенциальных площадок, достаточно близки, то представляется разумным на текущей стадии изысканий ограничиться исследованием теплового воздействия на ММГП для режима нормальной эксплуатации АСММ, например, для района Песчанки.

Результаты исследований теплового взаимодействия подземной АСММ с вмещающим массивом в двухмерной постановке достаточно подробно описаны в работах [63–67]. Среди основных выводов, сформулированных на основании анализа результатов расчетов по плоским моделям, можно выделить следующие:

- для исключения области оттаивания вокруг модулей АСММ целесообразно для их обделки применять материалы с низким коэффициентом теплопроводности (на уровне сотых Вт/(м·К)), при этом температура в модулях АСММ не должна превышать 20 °С, что можно обеспечить за счет дополнительных мероприятий по системе вентиляции;
- поскольку высокое значение пористости вмещающего массива обеспечивает существенные затраты энергии на фазовый переход «лед — вода», значения глубины оттаивания с ростом пористости будут снижаться.

Для объемного моделирования использована упрощенная геометрическая схема представления слоя криолитозоны мощностью 110 м в форме прямоугольного параллелепипеда. Чтобы минимизировать влияние граничных условий, горизонтальные размеры модели выбраны равными 200 м, при этом учитывалась производительность компьютерной техники. Модули подземной АСММ размещались в ММГП на глубине 50 м, как того требуют строительные нормативы Республики Саха (Якутия) [41].

Теплофизические параметры зон модели, которые обсуждались в работе [64], обобщены в табл. 3.1. Значения некоторых параметров зон модели (коэффициент теплопроводности обделки, пористость вмещающего массива) при решении ряда задач варьировались.

Таблица 3.1

Теплофизические параметры зон модели

Зоны модели	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³
ММГП («скелет»)	1,8	800	2200
Обделка	2,0	840	2500
Вода	0,613	4179	997
Лед	2,31	2052	918

Значение теплоты фазового перехода принято равным $3,33 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Начальные условия: для ММГП задано распределение температуры в виде линейной функции с геотермическим градиентом $0,02$ °С/м; для слоев обделки толщиной 1 м принята температура 5 °С.

Для решения тепловой задачи использованы следующие граничные условия:

1) на поверхности — условие 3-го рода (коэффициент теплообмена 10 Вт/(м²·К) и температура -10 °С, что примерно соответствует среднегодовой температуре в районе Билибино);

2) на боковых границах — условие симметрии, т. е. нулевые потоки тепла;

3) на нижней границе — фиксированная температура, определяющаяся глубиной границы и геотермическим градиентом, т. е. $-7,8$ °С.

3.1.1. Влияние объемно-компоновочных решений подземного комплекса на тепловое взаимодействие

В рамках проблемы оптимизации компоновочных решений подземного комплекса АСММ на основе анализа теплового состояния криолитозоны выполнены следующие исследования:

1) оценка толщины слоя криолитозоны с температурой ниже температуры фазового перехода «лед — вода» в зависимости от расстояния между модулями и пористости вмещающего массива;

2) влияние площади горизонтальной грани модулей (основание подземных выработок) на глубину оттаивания криолитозоны;

3) оценка области оттаивания криолитозоны при эксплуатации подземной многомодульной АСММ.

Оценка толщины слоя криолитозоны в зависимости от расстояния между модулями и пористости вмещающего массива.

Решаемая задача связана с проблемой оптимизации компоновочных решений подземного комплекса АСММ. При создании подземных выработок в криолитозоне важнейшим фактором является их тепловое воздействие на вмещающий массив, способное вызвать его оттаивание, что может привести к снижению устойчивости подземных сооружений. При этом в случае, когда для размещения подземного объекта (например, АСММ) необходим комплекс выработок, следует учитывать их взаимное тепловое воздействие на вмещающую многолетнемерзлую горную породу.

По мнению авторов, важной характеристикой будет являться толщина слоя породы между выработками, в котором температура не превысит порогового значения температуры фазового перехода «лед — вода» (0 °С) и, следовательно, в котором механические свойства мерзлой породы не претерпят значительных изменений. Кроме того, информация о тепловом состоянии вмещающего массива будет весьма полезна специалистам в области геомеханики, которые с использованием собственных [68] геомеханических моделей смогут рассчитать напряженно-деформированное состояние мерзлого породного массива с учетом перераспределения механических свойств горных пород в зависимости от изменения температурных полей вокруг модулей подземной АСММ.

Исследование выполнено для упрощенного варианта размещения многомодульной подземной АСММ [69]. Рассматривались два реакторных модуля цилиндрической формы. Целью исследования являлась оценка толщины слоя криолитозоны с температурой ниже температуры фазового перехода «лед — вода» в зависимости от расстояния между модулями и пористости вмещающего массива.

На рис. 3.1 представлена геометрическая схема размещения двух реакторных модулей подземной АСММ в слое криолитозоны. Модули размещены в ММГП на глубине в отметках -80 и -60 м. Внешние габариты модулей составляют: радиус — 10 м, высота — 20 м.

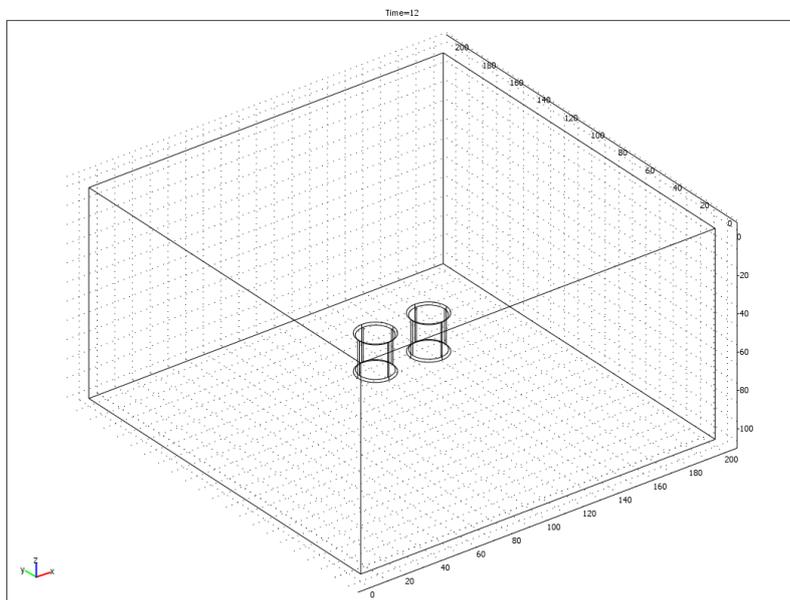


Рис. 3.1. Геометрическая схема двух реакторных модулей подземной АСММ в криолитозоне

В расчетах расстояние между центрами модулей составляло 25 , 30 , 40 , 50 и 60 м. Значения пористости ММГП составляли 5 , 10 и 15 %.

Рассматривается ситуация, когда температура в модулях АСММ фиксирована на уровне 20 °С.

Продолжительность времени моделирования ограничена 12 годами, что обусловлено серьезными затратами процессорного времени в численных экспериментах с высокими значениями пористости ММГП. Сохранение информации осуществлялось с временным шагом $0,5$ года.

При анализе результатов численных экспериментов, помимо картины пространственного распределения температуры вокруг модулей, позволяющей составить качественное представление о тепловом состоянии массива, рассматривался ряд количественных показателей. В частности, интерес представляла как динамика поведения температуры в конкретной точке моделируемой области, так и пространственные распределения температуры на конкретных участках пространства.

Для выбора точки криолитозоны, расположенной между модулями АСММ, температура в которой является главным показателем смыкания зон оттаивания между моделями, предварительно была прослежена динамика температуры вдоль вертикальной прямой, проходящей строго через середину модели. На рис. 3.2 представлены типичные пространственные распределения температуры вдоль указанной оси на различные моменты времени.

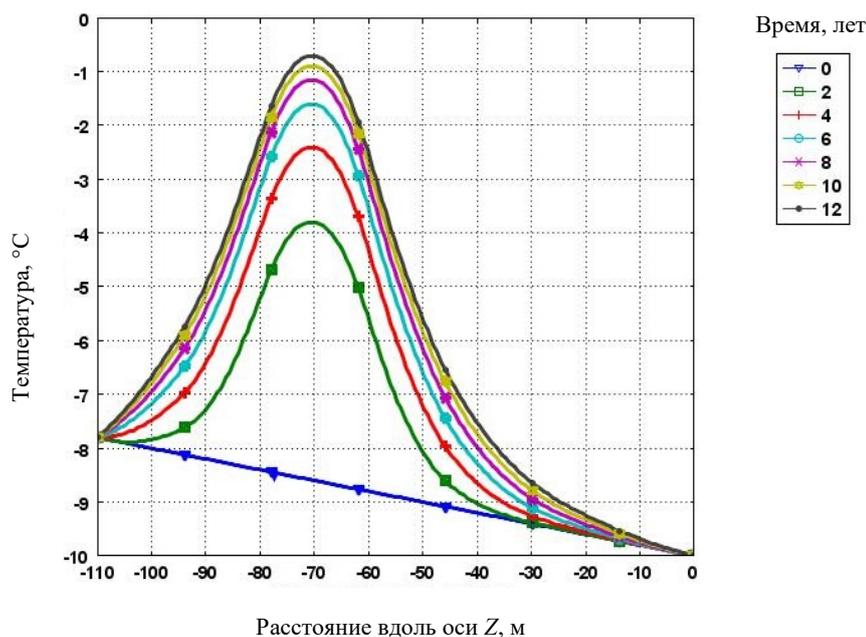
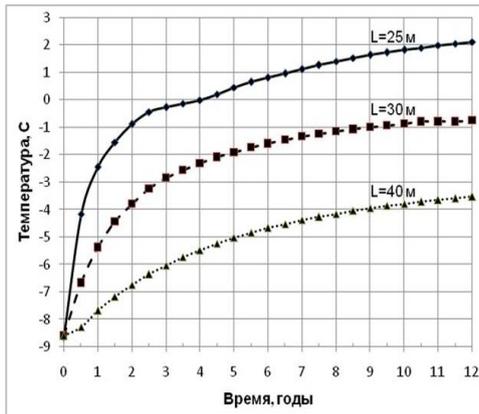


Рис. 3.2. Пространственные распределения температуры вдоль вертикальной оси Z , проходящей через центр модели, на различные моменты времени (пористость породы 10 %, расстояние между модулями 30 м)

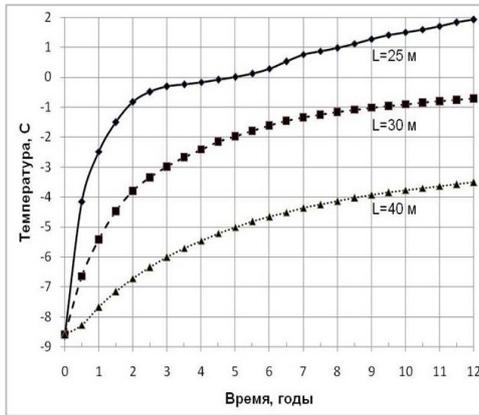
Результаты, представленные на рис. 3.2, соответствуют ситуации, когда расстояние между центрами модулей составляет 30 м, а пористость породы равна 10 %. Как видно из представленных на рисунке кривых, точку контроля для отслеживания смыкания зон оттаивания следует выбирать на высотной отметке -70 м, что соответствует середине высоты модулей.

Именно для выбранной точки контроля (координата вдоль вертикальной оси -70 м) и была прослежена динамика температуры. В качестве примера на рис. 3.3 приведена информация об изменении температуры во времени для трех вариантов расстояния между центрами модулей (25, 30 и 40 м), размещенных в криолитозоне с различной пористостью. Графики рис. 3.3 свидетельствуют, что за рассматриваемый период времени (12 лет) имеет место смыкание оттаявшей породы только в ситуации минимального расстояния между модулями. Причем оно происходит быстрее в том случае, когда пористость криолитозоны составляет 5 %. В этой ситуации процесс смыкания происходит примерно через 4 года (рис. 3.3, *a*). С увеличением пористости до 10 и 15 % смыкание оттаявшей породы прогнозируется в районе 5 (рис. 3.3, *b*) и 6 (рис. 3.3, *в*) лет соответственно. Такое поведение анализируемых кривых укладывается в высказанное авторами утверждение о снижении глубины оттаивания с ростом пористости [67].

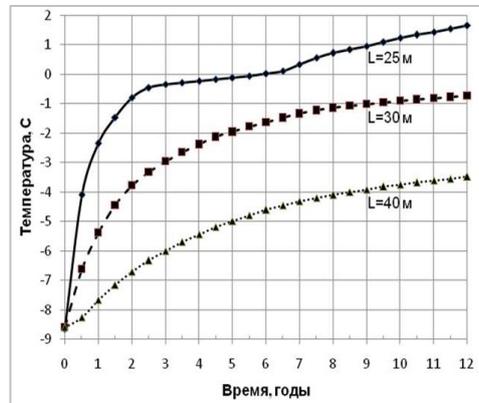
Увеличение расстояния между центрами модулей до 30 м позволяет обеспечить целостность криолитозоны в течение моделируемого срока. Но «запас» во времени весьма невелик — порядка 5–6 лет. А вот расстояние в 40 м (экстраполируя расчетные данные) гарантирует целостность криолитозоны на существенно большие времена (30–35 лет) функционирования подземной АСММ.



a

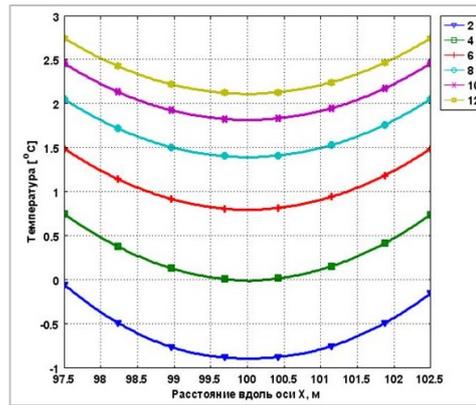


б

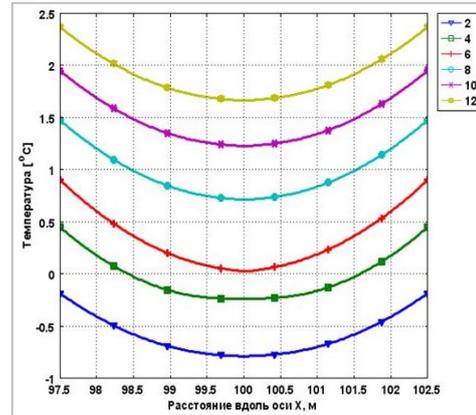


в

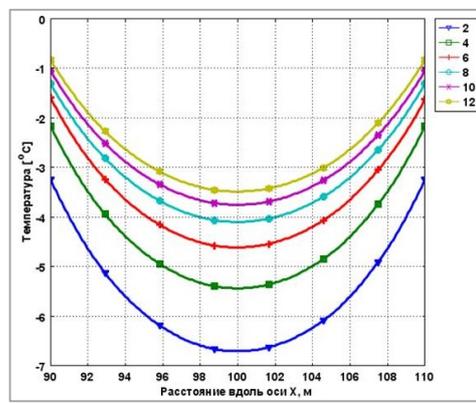
Рис. 3.3. Динамика температуры в точке мониторинга при различных расстояниях между модулями и вариации пористости ММГП: *a* — 5%; *б* — 10%; *в* — 15%



a



б



в

Рис. 3.4. Динамика пространственного распределения температуры при различных расстояниях между модулями и значениях пористости ММГП: *a* — $L = 25$ м, 5%; *б* — $L = 25$ м, 15%; *в* — $L = 40$ м, 15%

Рис. 3.4 представляет динамику пространственного распределения температуры вдоль горизонтальной оси X , проходящей через точку контроля, при различных расстояниях между модулями и значениях пористости ММГП. Графики рис. 3.4 позволяют составить представление о распределении температуры в пространстве между модулями во времени, а также о снижении скорости роста температуры. Естественно, что кривые рис. 3.4 находятся в полном соответствии с графиками рис. 3.3. Так, для минимального расстояния между модулями графики рис. 3.4, *a* и *б*, подтверждают факт перехода в оттаявшее состояние криолитозоны в районе 4 и 6 лет работы АСММ. Графики рис. 3.4, *в*, прекрасно иллюстрируют тот факт, что расстояние между центрами модулей 40 м обеспечивает целостность криолитозоны за рассматриваемый временной интервал. Кроме того, они позволяют видеть, что скорость прогрева мерзлоты существенно падает со временем, что делает возможным положительный прогноз сохранности криолитозоны при продолжительном времени функционирования подземной АСММ.

В табл. 3.2 обобщены расчетные данные во времени по величине расстояния сохранности криолитозоны (температура массива ниже 0 °С) вдоль горизонтальной оси, проходящей через точку контроля (см. рис. 3.3).

Таблица 3.2

Прогнозные расстояния сохранности криолитозоны

Пористость, %	Время работы АСММ											
	2 года			5 лет			8 лет			12 лет		
	Расстояние между центрами модулей, м											
	40	30	25	40	30	25	40	30	25	40	30	25
5	20	10	5	20	10	0	20	~9.2	0	20	~7,6	0
10	20	10	5	20	10	0	20	~9.6	0	20	~7,8	0
15	20	10	5	20	10	~1	20	~9.8	0	20	~8,0	0

* В рассмотрении оставлены три расстояния между центрами модулей (25, 30 и 40 м), поскольку при больших расстояниях (50 и 60 м) имеет место безусловная сохранность криолитозоны.

Таким образом, создана трехмерная компьютерная модель процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ней двух реакторных модулей цилиндрической формы подземной АСММ. На базе разработанной модели выполнены исследования по изменению температуры криолитозоны в зависимости от расстояния между центрами модулей и пористости вмещающей породы.

Анализ результатов численных экспериментов в форме динамики температуры в выбранной точке пространства и пространственном распределении температуры в наиболее критичном направлении позволяет сделать следующие выводы:

- прогнозируется смыкание оттаявшей породы в зависимости от пористости ММГП через 4–6 лет функционирования АСММ при расстоянии между центрами модулей 25 м;

- в течение 12-летнего периода сохранность ММП обеспечивается при расстоянии между центрами модулей 30 м независимо от величины пористости криолитозоны, однако временной «запас» сохранности криолитозоны на будущее невелик (5–6 лет);

- независимо от величины пористости криолитозоны расстояние 40 м и более между центрами модулей обеспечивает безусловную долговременную сохранность многолетнемерзлых горных пород.

Влияние площади горизонтальной грани подземных модулей (основание подземной выработки) на глубину оттаивания породного массива.

Из рассматриваемых специалистами Горного института КНЦ ориентировочных параметров подземных выработок для размещения основного оборудования АСММ с реакторными установками различного типа [1] в рамках обозначенной задачи исследовано два варианта: АСММ с реакторными установками АБВ-6 и СВБР-100. Для АСММ с АБВ-6 геометрические параметры следующие: реакторное отделение — $16 \times 16 \times 32$ м, турбинное — $10 \times 20 \times 17,5$ м. Для АСММ с СВБР-100 геометрические параметры следующие: реакторное отделение — $27,5 \times 39,3 \times 43$ м, турбинное — $42 \times 66 \times 37$ м. Для каждого варианта проанализированы два потенциальных способа размещения модулей с реакторными установками и модулей с турбинами. В первом случае модули разнесены на расстоянии 10 м, во втором — они расположены максимально компактно. Геометрические схемы моделей представлены на рис. 3.5, а, б, в и г, соответственно.

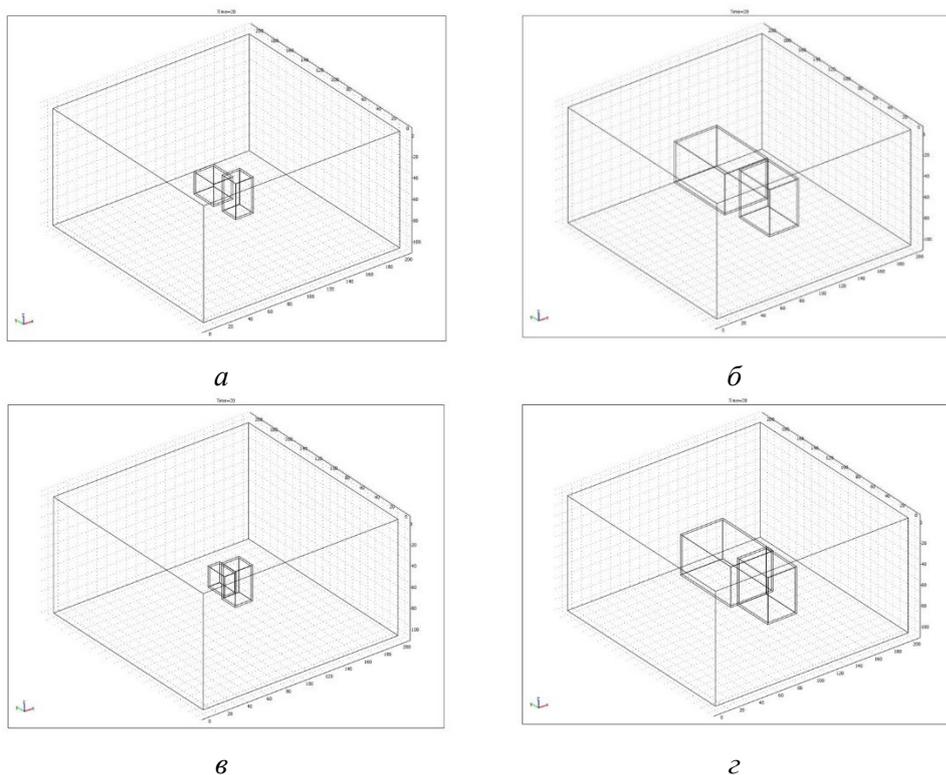


Рис. 3.5. Геометрическая схема моделей АБВ-6 (а и в), СВБР-100 (б и г)

Во всех случаях основание модулей располагалось на одинаковой высотной отметке -80 м, а предложенные размеры модулей были округлены и к ним добавлен метровый слой обделки (крепи).

Результаты расчетов в форме изоповерхностей температуры в центральных сечениях модели на 20 лет эксплуатации АСММ представлены на рис. 3.6 (а-г) и 3.7 (а-г) для АБВ-6 и СВБР-100 соответственно. Рис. 3.6 (а, б) и 3.7 (а, б) соответствуют раздельному расположению модулей, рис. 3.6 (в, г) и 3.7 (в, г) отвечают максимально компактному размещению модулей.

Очевидно, что за счет максимально компактного размещения модулей удается заметно сократить объем оттаявшей области криолитозоны, в первую очередь это достигается за счет пространства между модулями.

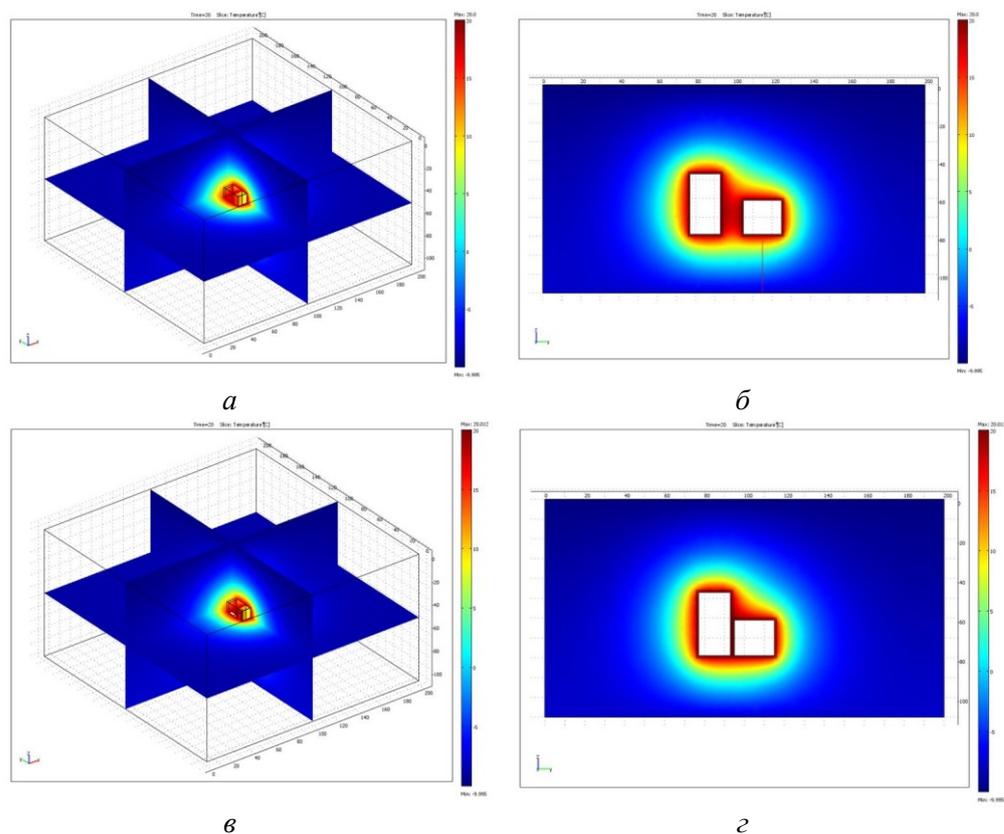


Рис. 3.6. Изоповерхности температуры на 20 лет эксплуатации АБВ-6

Анализ глубины оттаивания выполнен в вертикальном направлении. Этот выбор обусловлен следующими причинами. Во-первых, для начального описания распределения температуры в криолитозоне используется геотермический градиент. Во-вторых, основания модулей расположены на одинаковой высотной отметке. Поскольку вертикальные грани модулей имеют различные геометрические размеры, то центры прямоугольников, которым теоретически отвечают максимальные глубины оттаивания, будут располагаться на различной высоте. Результатом действия этих факторов станет смещение теоретического местоположения глубины максимального оттаивания.

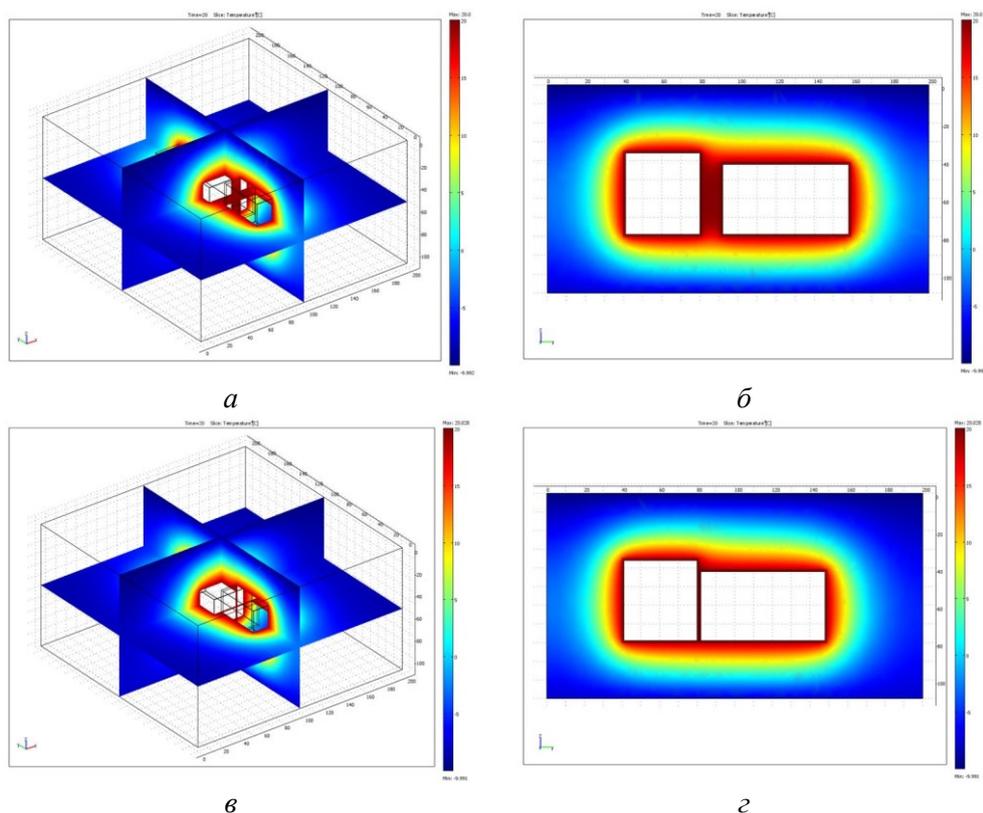
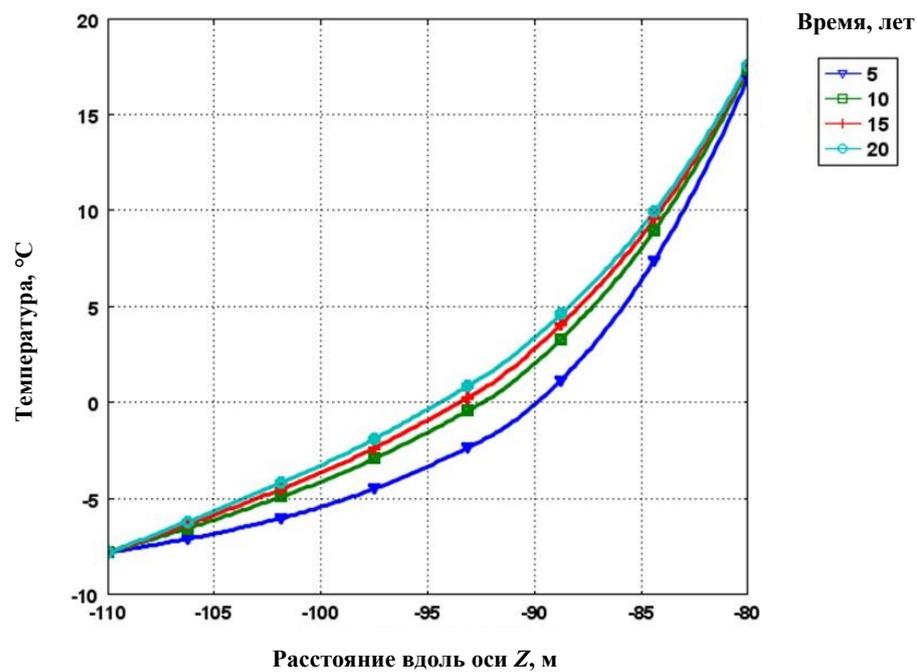


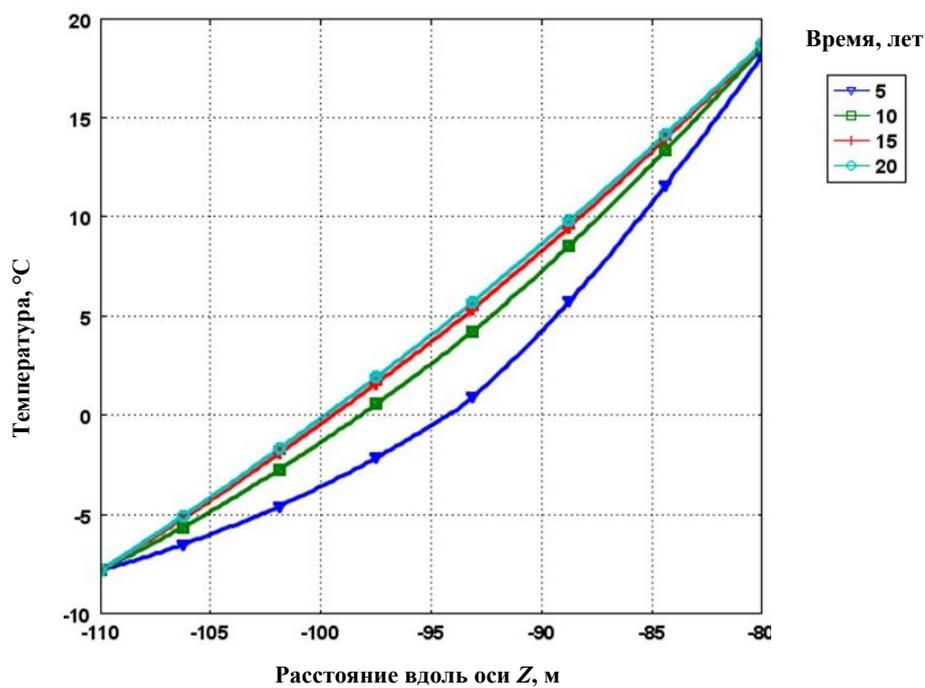
Рис. 3.7. Изоповерхности температуры на 20 лет эксплуатации СВБР-100

Напомним, что отсчет по вертикали вниз ведется от отметки -80 м. Пространственное распределение температуры на конкретные моменты времени вдоль оси Z для турбинных отделений АСММ с АБВ-6 и СВБР-100 представлены на рис. 3.8, *a* и *б*, соответственно. Прекрасно видно, что большей площади грани на один и тот же момент времени отвечает большая глубина оттаивания. На момент времени 20 лет кривая пространственного распределения температуры вдоль оси Z для турбинного отделения СВБР-100 (площадь грани почти 3000 м^2) практически становится линейной функцией, а глубина оттаивания достигает почти 20 м. В то же время для турбинного отделения АБВ-6 (площадь грани около 260 м^2) глубина оттаивания составляет примерно 15 м.

Дополнительно в табл. 3.3 и на рис. 3.9 обобщены расчетные данные по величинам глубины оттаивания под турбинными отделениями АСММ с АБВ-6 и СВБР-100 в зависимости от времени функционирования станции и размера модуля. Представленные расчетные данные свидетельствуют о нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади основания модуля. Имеем дело с монотонно возрастающей функцией, но первая производная которой падает с ростом площади основания модуля. В принципе, кривые с коэффициентами достоверности не ниже 0,969 (рис. 3.9) аппроксимируются логарифмическими функциями типа $H = A \ln(S) + B$, где H — глубина оттаивания, м; S — площадь основания модуля, м^2 ; коэффициенты A и B свои для каждого момента времени (5 лет — 1,789 и 0,155; 10 лет — 2,437 и $-0,959$; 15 лет — 2,389 и 0,610; 20 лет — 2,192 и 2,488).



a



б

Рис. 3.8. Пространственное распределение температуры на конкретные моменты времени вдоль оси Z для турбинных отделений АСММ с АБВ-6 (а) и СВБР-100 (б)

Таблица 3.3

Динамика глубины оттаивания
под турбинными отделениями АСММ с АБВ-6 и СВБР-100, м

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

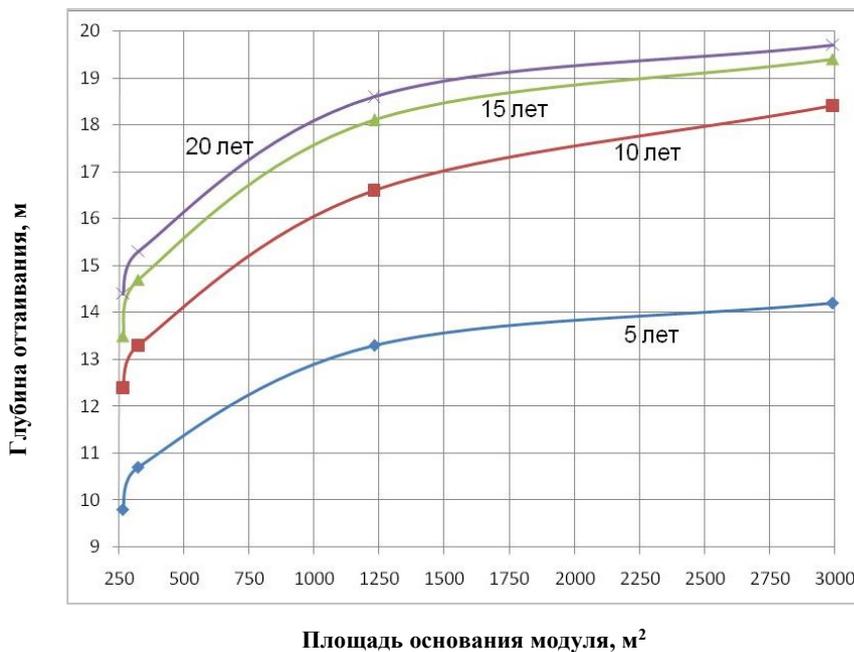


Рис. 3.9. Зависимость глубины оттаивания криолитозоны от площади основания модуля на конкретные моменты времени эксплуатации АСММ

Таким образом, были созданы трехмерные компьютерные модели процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ней двух отделений (реакторного и турбинного) подземной АСММ с реакторными установками АБВ-6 и СВБР-100. На базе разработанных моделей проведены исследования по оценке глубины оттаивания криолитозоны в зависимости от площади основания турбинных отделений. Рассмотрен интервал площадей оснований от ~250 до ~3000 м².

Анализ результатов численных экспериментов в форме изоповерхностей температуры в центральных сечениях модели, динамике пространственного распределения температуры в вертикальном направлении показал:

- минимальный объем оттаявшей породы обеспечивается максимально компактным размещением реакторного и турбинного отделений;

- глубина оттаивания криолитозоны нелинейным образом зависит от площади граней модулей. В течение 20 лет эксплуатации АСММ в указанном интервале площадей оснований прогнозируется диапазон глубины оттаивания от 10 до 20 м. В первом приближении для описания нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади граней модулей подходит логарифмическая функция.

Оценка области оттаивания криолитозоны при эксплуатации подземной многомодульной АСММ.

В 2015 г. специалисты Горного института КНЦ РАН в публикации [69] предложили принципиальную схему многомодульной подземной АСММ, включающей модули реакторных установок, машинного зала, технических служб и др. Именно для такого варианта размещения подземной АСММ выполнены исследования по оценке теплового состояния криолитозоны.

Целями исследования по данной задаче являются:

- создание компьютерной трехмерной модели процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ММГП многомодульной подземной АСММ;
- качественная и количественная оценки теплового состояния вмещающего массива и объема оттаявшей многолетнемерзлой горной породы во времени при функционировании АСММ в режиме нормальной эксплуатации с учетом вариации коэффициента теплопроводности обделки и пористости ММГП.

Геометрическая схема размещения многомодульной подземной АСММ в слое криолитозоны представлена на рис. 3.10.

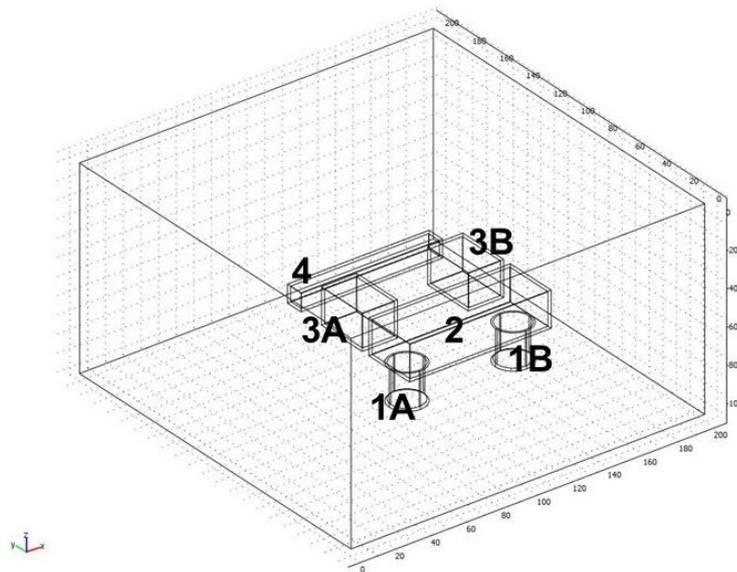


Рис. 3.10. Геометрическая схема многомодульной подземной АСММ в криолитозоне:
1А, 1В — модуль первой и второй реакторной установки соответственно;
2 — модуль реакторного зала, совмещенного со спецкорпусом;
3А, 3В — модуль первого и второго машинного зала соответственно;
4 — модуль технических служб

Все изображения приведены для одной и той же температурной легенды, что дает возможность создать качественное представление о важности выбора значения коэффициента теплопроводности обделки для минимизации области оттаивания. Кроме того, представленная графическая информация позволяет оценить суммарное проявление зон теплового воздействия от смежных модулей АСММ, а также температурные и площадные размеры этого воздействия на ММГП.

Высокие значения коэффициента теплопроводности обделки — 2,0 и 1,0 Вт/(м·К) (см. рис. 3.11, а и б, соответственно) позволяют получить наиболее презентабельные изображения. Хорошо видны заметные площади оттаявшей ММГП между модулями 2-3А и 2-3В, а также в пространстве между модулями 3А-4 и 3В-4. С уменьшением коэффициента теплопроводности обделки тепловое воздействие на ММГП существенно снижается. При минимальном значении коэффициента теплопроводности обделки — 0,05 Вт/(м·К) (см. рис. 3.11, д) области разогрева, а значит, и оттаивания, заметно уменьшаются. При этом графическая картина становится менее презентабельной.

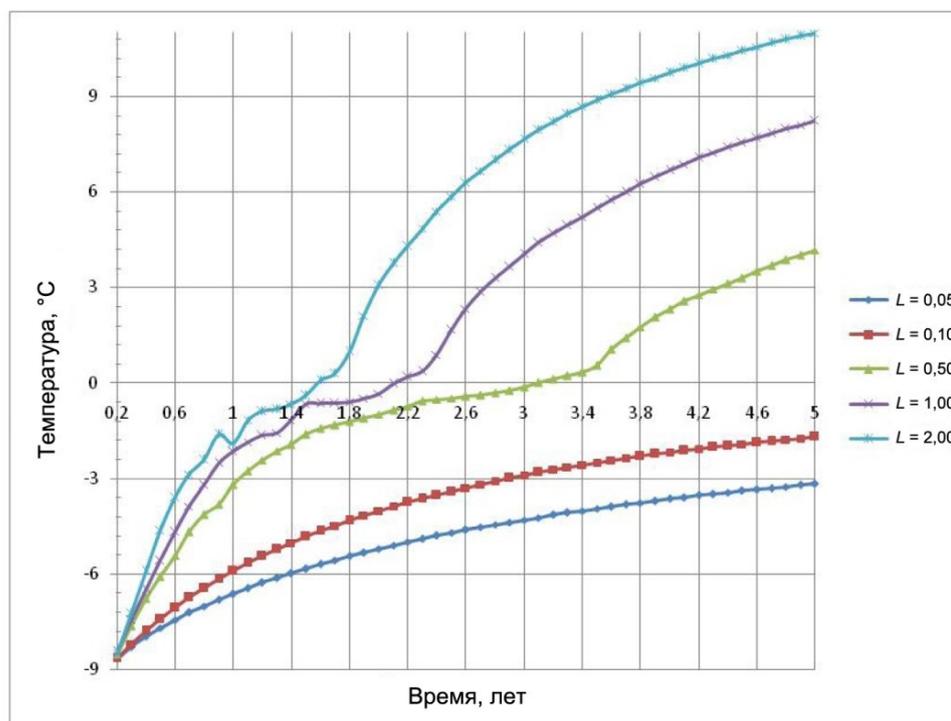


Рис. 3.12. Динамика температуры в точке контроля (координаты: 70; 107,5; -55) при вариации коэффициента теплопроводности обделки

Более наглядным количественным индикатором являются другие виды графиков. Например, на рис. 3.12 представлена динамика температуры в точке контроля (координаты: 70; 107,5; -55, т. е. примерно посередине между модулями 3А-4) при вариации коэффициента теплопроводности обделки. Прекрасно видно, что для больших значений коэффициента теплопроводности в точке контроля

имеет место фазовый переход «лед — вода». При этом процесс фазового перехода протекает в различные моменты времени — в более ранние при большем значении коэффициента теплопроводности. В нашем случае имеем следующие результаты: 1,5, 2,1 и 3,1 года при значениях коэффициента теплопроводности обделки 2,0, 1,0 и 0,5 Вт/(м·К) соответственно. В то же время для значений коэффициента теплопроводности 0,1 и 0,05 Вт/(м·К) явления фазового перехода в рассматриваемом интервале времени не прогнозируется.

В отличие от ситуации, описанной в работах [70, 71], где форма источника была простейшей (камера большого объема), в данном случае рассматривается более сложная компоновка подземных модулей АСММ. Естественно, в этих условиях и форма области оттаявшей породы будет приобретать во времени более сложные очертания, что затрудняет оценку оттаявшего объема с геометрических позиций. Использование опробованного в работах [70, 71] подхода к оценке объема оттаявшей породы существенно облегчает исследование влияния важного параметра — пористости вмещающего массива — на объем оттаявшей породы в условиях сложной геометрии подземной АСММ.

Для оценки объема оттаявшей породы удобно воспользоваться опцией программы, осуществляющей интегрирование ряда физических параметров. В частности, для области многолетнемерзлых пород удобно осуществлять контроль интегрирования такого параметра, как плотность.

Эффект значений коэффициента теплопроводности обделки и пористости ММГП на объем оттаявшей породы прослежен на результатах расчетов, выполненных на срок до 5 лет, что обусловлено существенными затратами процессорного времени в расчетах с максимальной пористостью. Анализ результатов показал, что увеличение коэффициента теплопроводности обделки приводит к безусловному росту отслеживаемых объемов оттаявшей породы. Если при коэффициентах теплопроводности обделки на уровне 1,0 и 2,0 Вт/(м·К) практически моментально начинают расти объемы оттаявшей породы, то при меньших значениях теплопроводности указанный процесс начинает запаздывать: чем меньше коэффициент теплопроводности, тем больше срок запаздывания. Второй интересный момент — эффект снижения объема оттаявшей породы с ростом величины пористости ММГП. Это находится в согласии с высказанным авторами утверждением, которое было сформулировано на основе анализа результатов работ, выполненных на базе двухмерных моделей. Данный результат объясняется физикой процесса: рост пористости увеличивает затраты энергии на фазовый переход «лед — вода», и при прочих равных условиях прогрев ММГП будет меньше.

В «долгоиграющих» расчетах (до 20 лет) прослежена динамика объема оттаявшей породы при тех параметрах теплопроводности обделки, которые обеспечивают вкуче с температурой внутри модулей минимум теплового воздействия подземной АСММ на ММГП, но при вариации пористости вмещающего массива. Результаты расчетов изображены на рис. 3.13.

Представленная информация свидетельствует о том, что при принятых значениях параметров модели в процессе функционирования подземной АСММ прогнозируются достаточно значительные объемы оттаявшей породы: порядка нескольких сотен тысяч кубических метров. Расположение графиков на рис. 3.13 вполне физично: внизу расположен график, отвечающий максимальной пористости. Именно при меньшей пористости, когда требуется меньшее количество теплоты на процесс растопления льда, при прочих равных условиях происходит прогрев выше температуры фазового перехода большего объема породы.

Все три графика динамики объема оттаявшей породы (рис. 3.13) хорошо описываются с высокой степенью достоверности (0,998) посредством квадратичной функции $V1 = A \cdot t^2 + B \cdot t + C$, где $V1$ — объем оттаявшей породы, м³; t — время, годы; A , B и C — коэффициенты аппроксимации (свои для каждого значения пористости) (см. табл. 3.4).

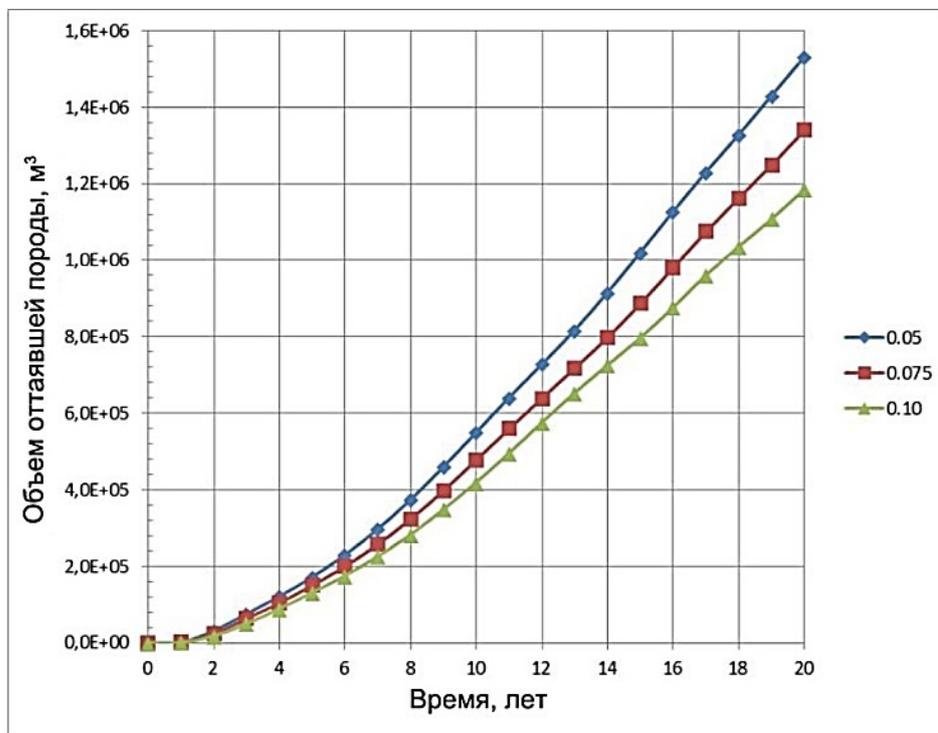


Рис. 3.13. Динамика объема оттаявшей породы для минимального значения коэффициента теплопроводности обделки при вариации пористости ММП (0,05, 0,075, 0,10)

Полученная аналитическая зависимость динамики объема оттаявшей породы позволяет легко получить функциональную зависимость скорости объема оттаявшей породы во времени $V2 = 2A \cdot t + B$, где $V2$ — скорость объема оттаявшей породы, м³/год. Значение скорости объема оттаявшей породы минимально для максимального значения пористости.

Таблица 3.4

Коэффициенты аппроксимации квадратичной функции объема оттаявшей породы при вариации пористости многолетнемерзлых пород

Пористость	A , м ³ /год ²	B , м ³ /год	C , м ³
0,05	2186	36992	45319
0,075	1928	32009	40656
0,10	1669	29758	41858

3.1.2. Оценка способов управления криогенным состоянием породного массива

Исследования по разработке рекомендаций по выбору конструктивных параметров подземных модулей АСММ в криолитозоне выполнены на базе двухмерного численного моделирования. В первой задаче рассмотрены примеры схем замораживания массива для обеспечения стабильности ММГП, во второй — исследовано применение встроенных систем замораживания, направленное на обеспечение тепловой безопасности подземной АСММ.

Примеры схем замораживания массива для обеспечения стабильности многолетнемерзлых пород.

В работах [63–66] показано, что в простейшей компоновке (реакторный зал и два модуля с реакторными установками) в режиме нормальной эксплуатации при определенных значениях теплофизических параметров обделки модулей и температуре в массиве будет иметь место образование крупных зон оттаивания. Пространственное распределение температурных полей в массиве (рис. 3.14) прекрасно иллюстрирует образование вокруг модулей станции значительных областей, где прогнозируется температура выше температуры фазового перехода «лед — вода». А значит, в силу снижения геомеханической устойчивости массива и стабильности многолетнемерзлых пород будут появляться обоснованные сомнения и вопросы по обеспечению безопасной эксплуатации АСММ.

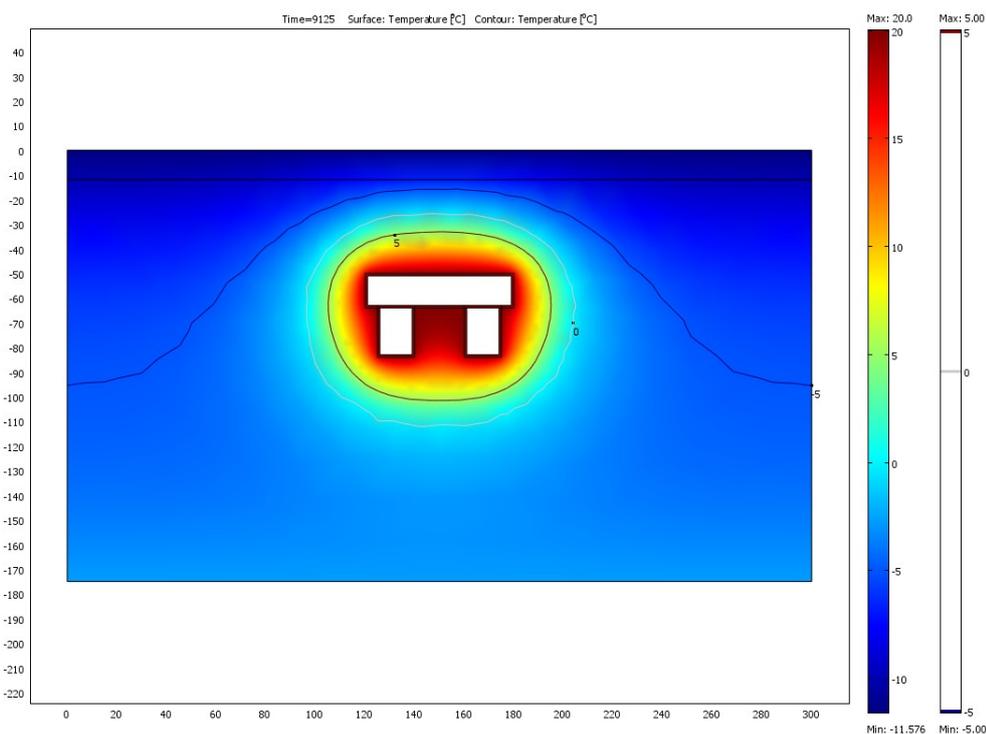


Рис. 3.14. Пространственное распределение температуры и ее изолиний во вмещающем массиве без применения искусственного замораживания

В рамках указанной задачи авторы монографии на базе численного моделирования в двухмерной постановке для решения указанной проблемы рассмотрели использование традиционного способа — искусственное замораживание массива посредством создания инженерного ограждения по периметру модулей станции. В этом ограждении с использованием замораживающих труб необходимо поддерживать температуру ниже температуры фазового перехода «лед — вода». В рассмотренном случае температура хладоносителя в трубах поддерживалась на уровне -3 °С. Размещение охлаждающего ограждения было рассмотрено с внешней стороны модулей, т. е. в самом массиве.

Не вдаваясь в технологию инженерного осуществления процесса искусственного замораживания (см., например, [72]), ниже мы представили некоторые результаты численных экспериментов по обеспечению стабильности вмещающего массива многолетнемерзлых пород. Рассмотрены три схемы замораживания массива вокруг модулей станции (рис. 3.15). Геометрические размеры области моделирования и модулей станции рис. 3.15 строго соответствуют аналогичным параметрам рис. 3.14.

Схема 1 — «прямоугольный» контур (см. рис. 3.15, *а*). Представляется, что это наиболее простая в плане осуществления схема замораживания. Хорошо видно (сравни рис. 3.14 и 3.15, *а*), что в этом случае стабильность многолетнемерзлого массива над машинным залом восстанавливается. Однако для заметных областей массива между модулями с реакторными установками и с внешней стороны модулей по-прежнему прогнозируются положительные температуры. Для их устранения последовательно рассмотрены следующие две схемы.

Схема 2 — модернизированный «прямоугольный» контур с целью ликвидации области оттаивания между модулями с реакторными установками (см. рис. 3.14 и 3.15, *б*). Действительно, усложнение схемы замораживания под машинным залом позволяет вернуть вмещающий массив практически в его природное стабильно устойчивое состояние. С положительными температурами остаются области с внешней стороны модулей с реакторными установками.

Схема 3 — плотное геометрическое «оконтуривание» всех модулей станции (см. рис. 3.15, *в*). Именно самая сложная схема замораживания позволяет устранить последнее «слабое» место, а точнее говоря, боковые области модулей с реакторными установками.

Таким образом, на базе реализованных в двухмерной постановке компьютерных моделей продемонстрирована эффективность принципиальных схем искусственного замораживания массива с внешней стороны модулей, в результате чего вмещающий массив практически сохраняет свои природные показатели по температурным распределениям, следовательно, и по своей стабильности.

В качестве примера разработанной в Горном институте КНЦ РАН объемной компьютерной модели, на базе которой выполнено исследование влияния пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания ледопородного ограждения, приведем статью [73]. В указанной работе рассмотрена задача по замораживанию влажного породного массива посредством размещения вокруг проектируемого вертикального ствола системы

замораживающих скважин. Проанализированы широкие интервалы пористости породного массива (от 0 до 20 %) и температуры хладоносителя в замораживающих скважинах (от -25 до -10 °С). Показано, что при ненулевой пористости массива прогнозируемое время создания ледопородного ограждения варьируется в интервале от 20 до 100 суток. Принципиально возможно создание аналогичной модели схем замораживания массива для обеспечения стабильности многолетнемерзлых пород и под проблему АСММ.

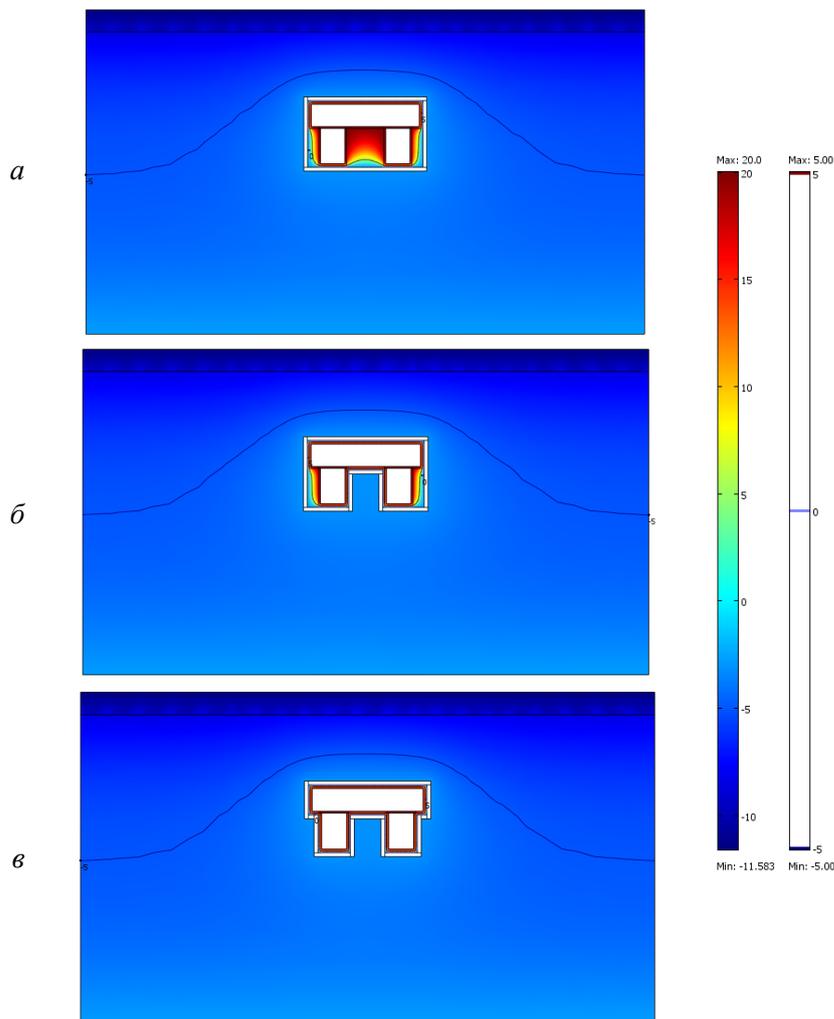


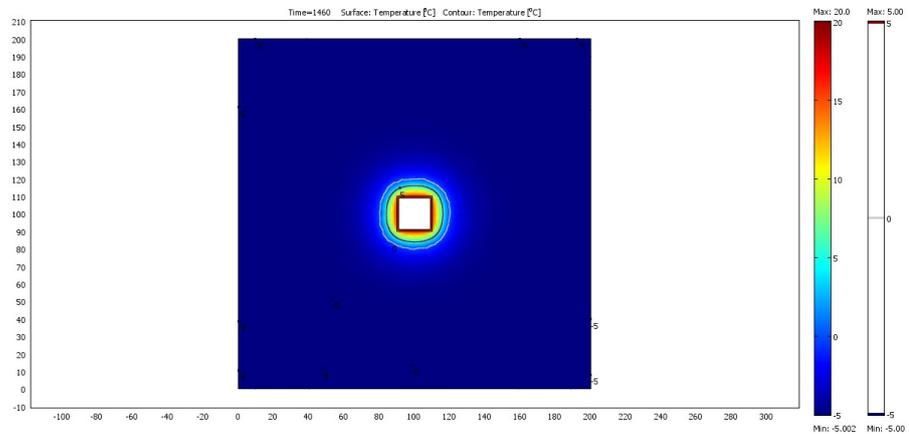
Рис. 3.15. Пространственное распределение температуры и ее изолиний во вмещающем массиве с применением схем искусственного замораживания: *а* — схема 1; *б* — схема 2; *в* — схема 3

Оценка эффективности встроенных систем замораживания.

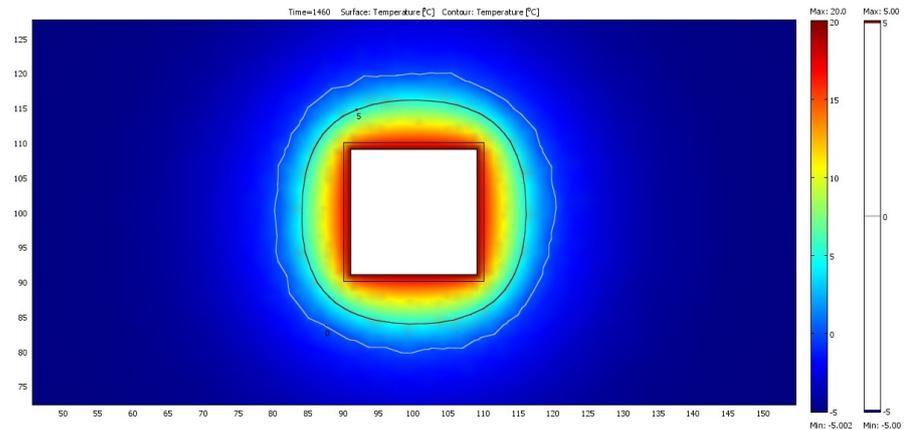
В рамках этой задачи авторы монографии на базе численного моделирования в двухмерной постановке рассмотрели применение для обеспечения стабильности криолитозоны способа искусственного замораживания массива посредством

встроенных в обделку модулей станции труб охлаждения. Полагается, что технология инженерной реализации такой системы замораживания имеется (см., например [72, 74–78]). В этих трубах необходимо поддерживать температуру хладоносителя ниже температуры фазового перехода «лед — вода», причем как значение температуры хладоносителя, так и параметры встроенных систем (радиус труб, их количество на единицу длины) должны быть обоснованы под соответствующие условия.

В центре области 200×200 м со свойствами многолетнемерзлых пород (начальная температура -5 °С) размещен объект с внешними размерами 20×20 м (толщина обделки составляет 1 м). На внутренней поверхности обделки поддерживается температура 20 °С. Через 4 года модельного процесса, имитирующего нормальную эксплуатацию станции без применения системы замораживания, пространственное распределение температуры и ее изолиний в исследуемой области будет таким, как на рис. 3.16. Видно, что максимальная глубина оттаивания составит около 10 м.



a

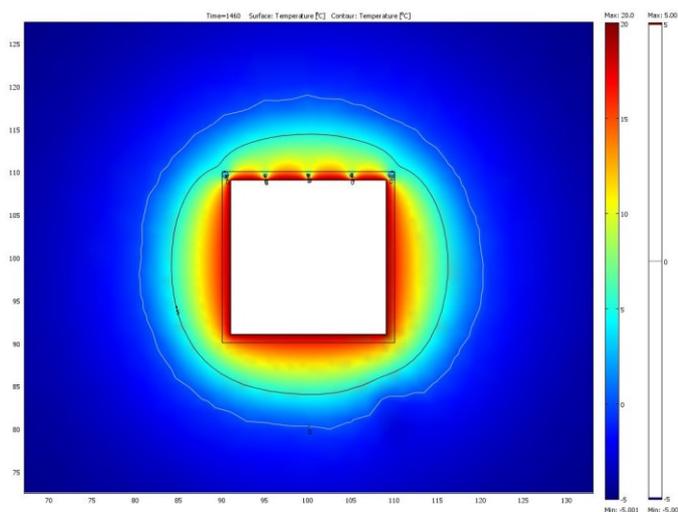


б

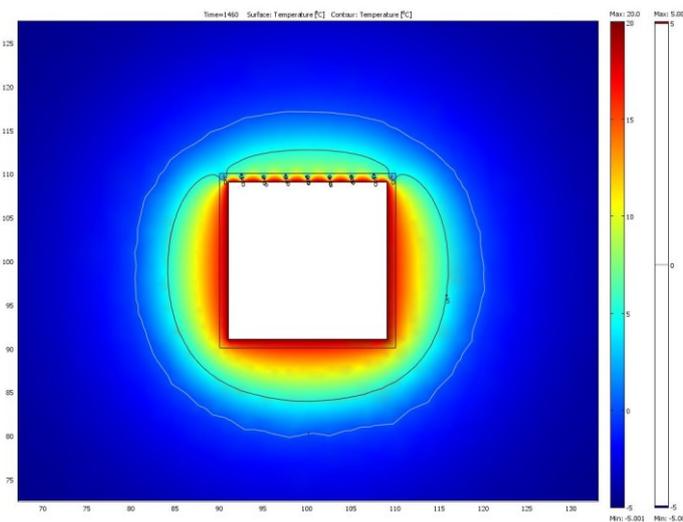
Рис. 3.16. Пространственное распределение температуры и ее изолиний через 4 года модельного времени:
a — вся область; *б* — фрагмент области

Для того чтобы уменьшить глубину оттаивания в верхней стенке объекта (вдоль оси X в координатах от 90 до 110 м, координата по оси Y — 109,5 м) симметрично разместим 5 или 9 труб охлаждения (радиус 0,05 м) с хладоносителем. Температура хладоносителя в процессе моделирования поддерживается постоянной, но проварьирована по следующим значениям: -3 , -13 и -23 °С.

Результаты моделирования пространственного распределения температуры и ее изолиний для обозначенных условий по температуре хладоносителя и количеству труб охлаждения представлены на рис. 3.17–3.19. В табл. 3.5 приведены значения температуры на 4 года процесса моделирования для вариантов с 5 и 9 трубами в точках контроля с координатами (100, 111 м), расположенных на расстоянии 1 м от рассматриваемой стенки.

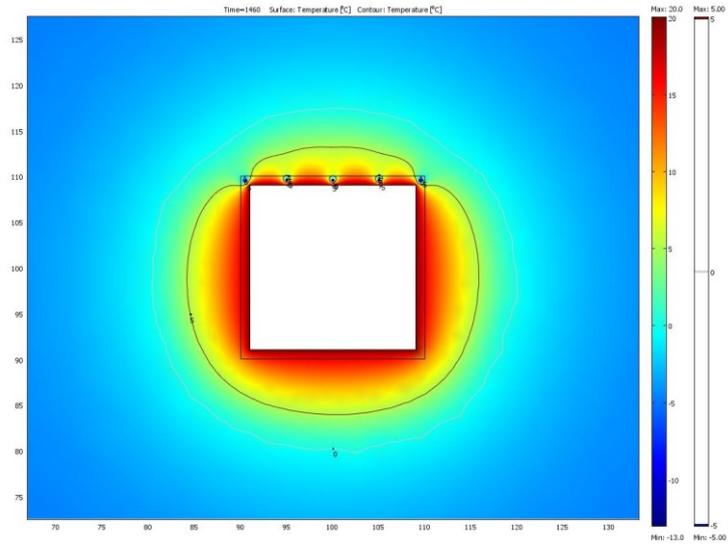


a

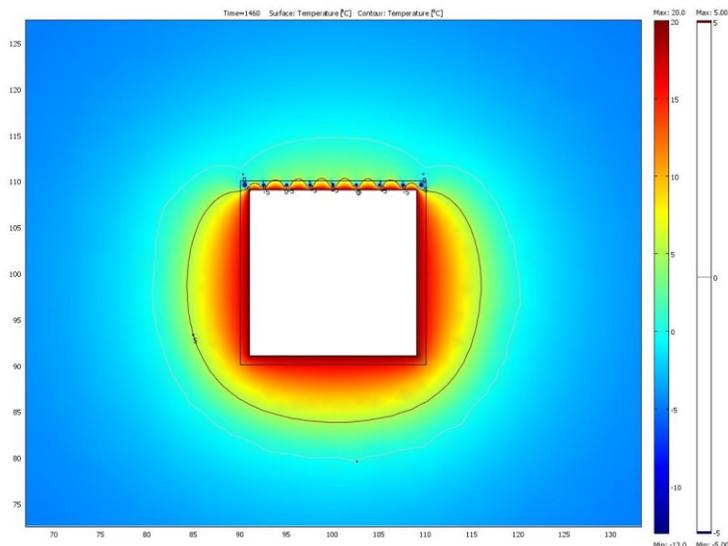


б

Рис. 3.17. Пространственное распределение температуры и ее изолиний через 4 года моделирования при температуре хладоносителя -3 °С:
a — 5 труб; *б* — 9 труб



a



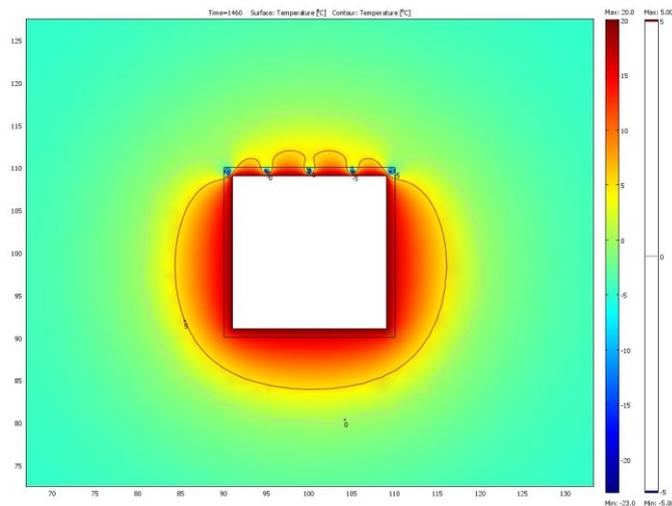
б

Рис. 3.18. Пространственное распределение температуры и ее изолиний через 4 года моделирования при температуре хладагителя $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$:
a — 5 труб; *б* — 9 труб

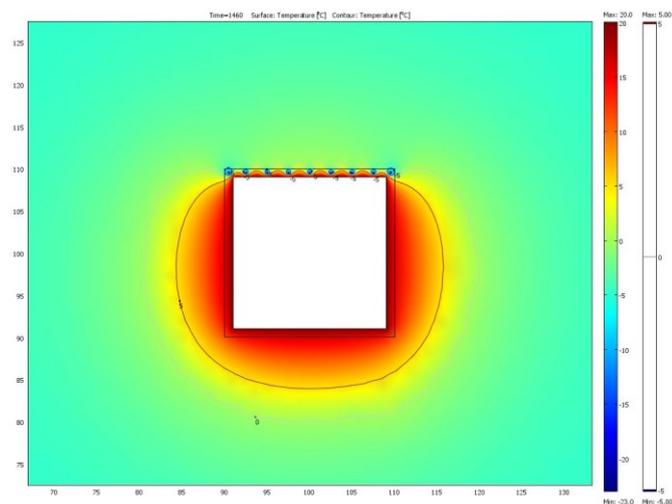
Таблица 3.5

Значения температуры в точке контроля, $^{\circ}\text{C}$
на 4 года процесса моделирования (радиус труб охлаждения 0,05 м)

Количество труб	Температура хладагителя, $^{\circ}\text{C}$		
	-3	-13	-23
5	9,75	7,20	4,66
9	7,18	3,11	-0,45



a



б

Рис. 3.19. Пространственное распределение температуры и ее изолиний через 4 года моделирования при температуре хладоносителя $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$:
a — 5 труб; *б* — 9 труб

Таким образом, при наличии 9 труб охлаждения радиусом 0,05 м и температуре хладоносителя $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически достигается желаемый результат: массив находится в состоянии, близком к естественному, т. е. обеспечивается стабильность пород, а значит, и тепловая безопасность эксплуатации подземной АСММ. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что эффект использования встроенных систем замораживания срабатывает. Именно со стороны стенки модуля со встроенными трубами охлаждения проявляется уменьшение (в различной степени) размера области оттаивания. При температуре хладоносителя -3 , -13 и $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдаем следующую тенденцию снижения максимального размера вдоль оси Y области оттаивания для 5 или 9 труб охлаждения: ~ 8 и ~ 7 м, ~ 7 и ~ 5 м, ~ 5 и ~ 1 м соответственно.

Результаты табл. 3.5 также свидетельствуют о «правильном» срабатывании предложенной системы замораживания: и увеличение количества труб, и снижение температуры хладоносителя приводят к желаемому результату: состояние массива близко к природному.

Строго говоря, выбор радиуса труб систем замораживания на уровне 0,05 м на данной стадии был достаточно произвольным. Поэтому предпринята попытка спрогнозировать требования по температуре хладоносителя, обеспечивающие тепловую безопасность объекта, когда радиус труб охлаждения равен 0,02 м. Как и следовало ожидать из физики процесса, при меньшем геометрическом размере труб для обеспечения сохранности мерзлого состояния массива, прилегающего к стенке, требуется понизить температуру хладоносителя.

В табл. 3.6 приведены сведения о температуре в точке контроля (координаты 100, 111 м), расположенной на расстоянии 1 м от рассматриваемой стенки, на 4 года процесса моделирования для вариантов с 5 и 9 трубами. Результаты расчетов, приведенные в табл. 3.6, также подтверждают вывод, сделанный для труб радиусом 0,05 м: для достижения природного состояния массива необходимо или увеличивать количество труб охлаждения, или снижать температуру хладоносителя.

Таблица 3.6

Значения температуры в точке контроля, °С
на 4 года процесса моделирования (радиус труб охлаждения 0,02 м)

Количество труб	Температура хладоносителя, °С				
	-3	-13	-23	-33	-43
5	10,7	8,60	6,62	4,63	2,68
9	8,69	5,45	2,34	-0,39	-3,09

В качестве дополнительной информации на рис. 3.20 представлена динамика распределения температуры в массиве вдоль верхней стенки на расстоянии 1 м от нее при температуре хладоносителя -43 °С. Рис. 3.20, а, соответствует варианту с 5, а рис. 3.20, б, — с 9 трубами. Первая диаграмма (рис. 3.20, а) убедительно свидетельствует о том, что даже при температуре хладоносителя -43 °С наличия 5 труб охлаждения явно недостаточно для поддержания мерзлого состояния граничащего со стенкой объекта массива. Требуется увеличить количество труб до 9, чтобы гарантированно обеспечить температуру массива ниже температуры фазового перехода «лед — вода» и выполнить поставленную задачу по обеспечению прочности и стабильности массива. Анализ поведения кривых на рис. 3.20, показывает, что имеется значительное различие в скорости разогрева массива (особенно в первые два года процесса моделирования) для варианта с 5 (на уровне 0,5–1 °С/год) и с 9 трубами (десятые доли градуса Цельсия в год).

Таким образом, в двухмерной постановке методами численного моделирования продемонстрированы принципиальные схемы искусственного замораживания вмещающего массива посредством применения встроенной в обделку модуля системы труб охлаждения. Показано, что при заданных параметрах массива и модуля (размеры, теплофизические характеристики)

построенные численные модели позволяют определить количество и размеры труб охлаждения, температуру хладоносителя, практически обеспечивающие природные показатели вмещающего массива по температурным распределениям, а значит, его стабильности.

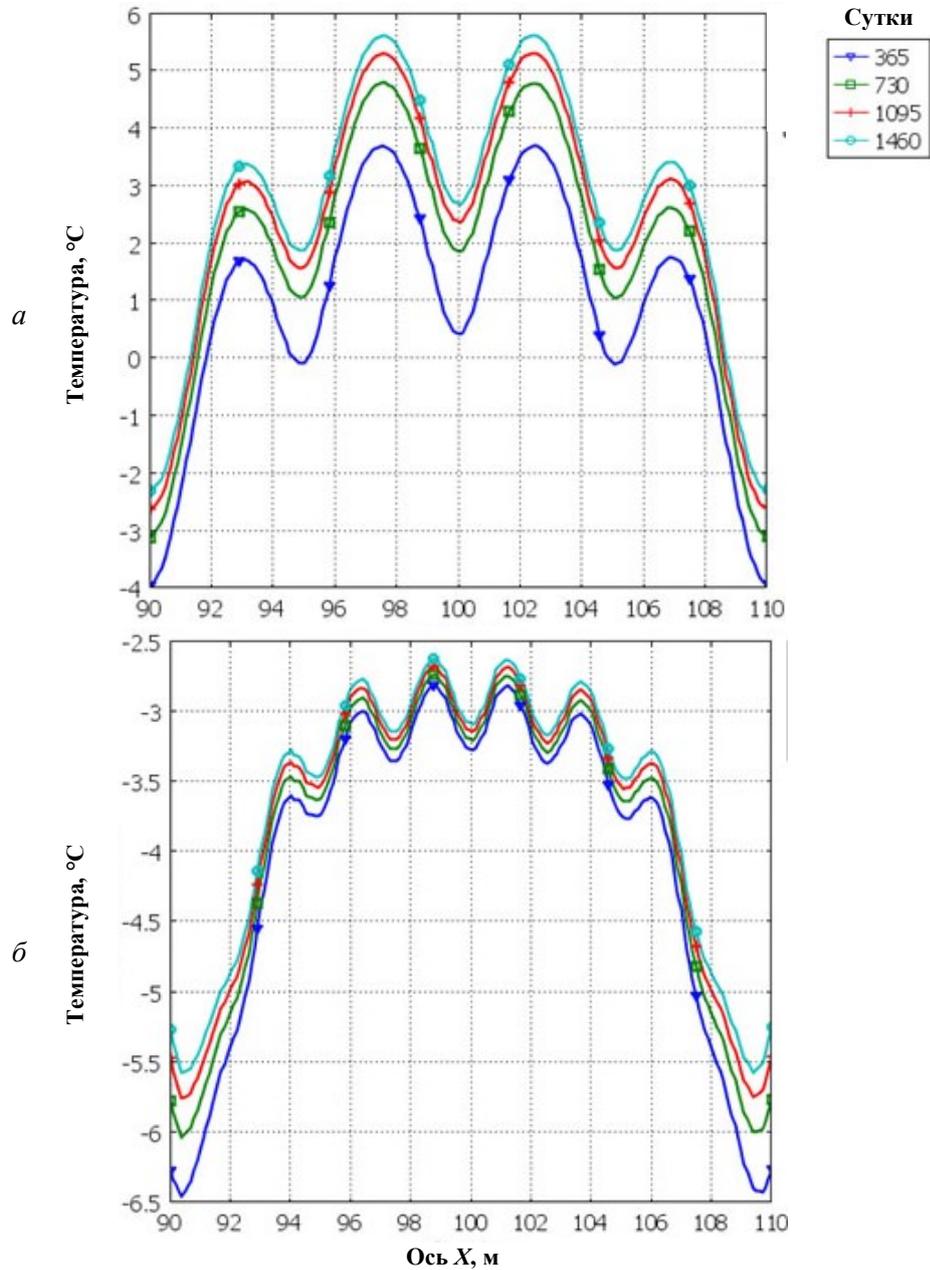


Рис. 3.20. Динамика распределения температуры вдоль верхней стенки модуля (на расстоянии 1 м) при температуре хладоносителя -43°C и радиусе труб 0,02 м:
a — 5 труб; *б* — 9 труб

3.2. Проблема отвода тепла от конденсаторов турбин АЭС и оценка теплового воздействия АСММ на водоем-охладитель в арктических условиях

3.2.1. Проблема отвода тепла

От многих агрегатов АЭС (как основных, так и вспомогательных) необходимо отводить в окружающую среду большое количество теплоты. Для того чтобы охлаждающие поверхности и устройства в пределах главного корпуса были компактными, в качестве промежуточной охлаждающей среды для оборудования и помещений главного корпуса используют техническую воду, которую потом охлаждают вне главного корпуса. Отдельные системы охлаждения, объединенные в единую, называют системой технического водоснабжения. Техническое водоснабжение имеет немаловажное значение для работы АЭС, во многом определяя надежность и экономичность ее работы.

Нужно отметить, что до 90 % сбрасываемого в окружающую среду тепла приходится на охлаждение конденсаторов турбин [79]. Именно конденсаторы турбин требуют наиболее глубокого охлаждения, т. е. наименьшей температуры воды на входе в конденсатор. Поэтому выбор системы охлаждения технической воды нужно рассматривать прежде всего применительно к циркуляционной воде конденсаторов.

Сброс подогретых вод приводит к существенному изменению физико-химических свойств воды в водоемах: плотности, вязкости, поверхностного натяжения, растворимости газов, давления водяного пара. Вследствие увеличения испарения происходит изменение водного баланса водоема-охладителя. Температура является важным абиотическим фактором среды, управляющим структурой и метаболизмом экосистемы, причем ее воздействие на физиологию и поведение организмов может проявляться как прямо, так и опосредованно через изменение вязкости воды, растворимости кислорода и т. д.

Повышение температуры воды оказывает значительное воздействие на биологические процессы в водоеме: ускоряется разложение органических остатков, усиливается дыхание рыб и других водных организмов. Наблюдается быстрое потребление кислорода и создание заморных зон в отдельных частях водоема. Повышенная температура стимулирует зарастание мелководных водоемов водной растительностью. Могут также наблюдаться вспышки цветения водорослей [80].

Тепловые сбросы оказывают также существенное влияние на атмосферу вблизи расположения АЭС, ухудшая видимость и приводя к обледенению в холодное время близлежащих конструкций и проводов. По данным мониторинга Запорожской АЭС, тепловое влияние водоема-охладителя на атмосферу, с реактором ВВЭР-1000 фиксируется в течение всего года, оно достигает высот 250–300 м и более и прослеживается на расстоянии до 10 км. В теплый период года влияние водоема на изменение температуры воздуха незначительно: в малооблачную погоду на удаленностях до 100–200 м отмечается повышение температуры на 1,6 °С, в пасмурную — на 1,1 °С. В холодный период года при достаточно высокой влажности воздуха над водоемом образуются туманы-парения, распространяющиеся на побережье, а в отдельные дни — на расстояние 2,0–2,5 км от береговой линии. При этом зона ухудшенной видимости может отмечаться на удаленностях до 5 км [81]. В зоне туманов

наблюдается повышенная влажность воздуха, прекращается инсоляция, возникают гололедно-изморозные явления, увеличивается интенсивность коррозионных процессов металлических и бетонных конструкций.

Известно, что подогрев воды в водоеме-охладителе АЭС до уровня 40 °С является летальным практически для всех высокоорганизованных видов гидробионтов. Массовая гибель рыб начинается при 30 °С. Спровоцированное повышением температуры разложение отмирающей водной растительности и органических донных отложений сопровождается гипоксией. По этой причине в первую очередь наблюдается массовая гибель рыбы, наименее устойчивой к ухудшению кислородного режима.

Критическое понижение температуры в водоемах-охладителях также может иметь катастрофические последствия. Такие события обычно происходят в результате совпадения во времени низких зимних температур воздуха и понижения мощности работы электростанции. Например, подобное явление наблюдалось на водоеме-охладителе Курской АЭС зимой 2009 г. В течение нескольких часов произошла гибель большей части теплолюбивой тиляпии. В последующий период, чтобы предотвратить ухудшение санитарно-эпидемиологических условий, водолазами было извлечено несколько десятков тонн этой рыбы.

При оценке последствий критических понижений температуры следует также учитывать то, что практически все виды, гибнущие в такие периоды, являются биомелиораторами. Их жизнедеятельность способствует повышению безопасности работы АЭС и улучшению экологического состояния водоема-охладителя, при этом если в отношении критического повышения температуры уже давно разработаны и действуют соответствующие природоохранные нормы, то в отношении критического понижения температуры подобные нормы отсутствуют.

В зависимости от системы технического водоснабжения АЭС, типа и параметров водного объекта (форма, глубина, проточность) в водоемах-охладителях создаются своеобразные термические условия, сказывающиеся на биологическом режиме и, следовательно, на технических и санитарных качествах воды. Институтом гидробиологии АН Украины были выполнены комплексные исследования водоемов-охладителей тепловых станций южной зоны Украины, которые показали следующие результаты [82]:

- слабый подогрев водоема (на 0,5–3 °С) вызывает существенные сдвиги в развитии флоры и фауны водоемов только на участках, расположенных вблизи сброса подогретых вод;
- сильный подогрев вызывает существенные сдвиги в гидробиологическом режиме на большой акватории. В результате круглогодичного сброса теплых вод повышается среднегодовая за вегетационный период температура воды, удлиняется вегетационный период, сглаживаются сезонные ритмы в жизни водоема;
- реакция растительных и животных группировок на повышение температуры воды в разные сезоны года неодинакова. В летнее время высокие температуры (до 28–30 °С) оказывают стимулирующее воздействие только на отдельные группы организмов. Большинство представителей планктофауны испытывает угнетение при кратковременных температурах выше 28–29 °С;

- допустимый нагрев воды, который не сказывается отрицательно на видовом разнообразии и количественном развитии большинства видов лимнофилов в водоеме-охладителе, не должен превышать 28 °С на поверхности и 25 °С у дна водоема. Эти показатели лежат в пределах установленных санитарных норм.

На основании комплексных исследований гидробиологического и теплового режимов водоемы-охладители АЭС [4] классифицируются на три группы: по показателям среднегодовых температур; по максимальным показателям перегрева воды и удельной тепловой нагрузки; по изменениям в гидробиологическом режиме (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Классификация водоемов-охладителей (ВО) в зависимости от степени нагрева воды [82]

Степень нагрева воды	Тепловая нагрузка в теплый период года, Вт/м ²	Повышение температуры воды в ВО по сравнению с естественной в наиболее жаркую декаду, °С	Изменения режима ВО, вызванные нагревом воды
Слабая	50–100	0,5–1,5	Гидрохимический и гидробиологический режимы изменены незначительно, удлинение вегетационного периода вызывает интенсификацию развития планктона
Умеренная	150–200	5,0–6,0	Количество биомассы возрастает в несколько раз
Значительная	250–300	>6,0	Заметно снижается биологическая продуктивность, усугубляется при сбросе в водоем плохо очищенных сточных вод

Биологическая реакция на воздействие тепла может происходить на биохимическом, физиологическом, популяционном и биоценологическом уровнях. Существенно, что термальные эффекты в водных экосистемах не могут быть категорически классифицированы как отрицательные или положительные без полного осознания всех взаимодействующих факторов и последующих экологических эффектов. Представленная выше информация еще раз говорит о серьезности проблемы отвода тепла с АЭС в природную среду.

Для отвода тепла от конденсаторов турбин АЭС могут использоваться различные системы водоохлаждения. В работе [1] авторами монографии выполнен анализ существующих систем охлаждения [79, 81, 83–92] и сделан

вывод о том, что водоемы-охладители, в отличие от градирен и брызгательных бассейнов, обеспечивают в течение всего года оптимальное значение температуры охлаждающей воды (10–16 °С), что позволяет сохранять глубокий вакуум в конденсаторе турбины и, соответственно, выдавать номинальную мощность. К тому же наличие водоема-охладителя исключает необходимость подачи воды на значительную высоту, что сокращает расход электроэнергии на привод циркуляционных насосов. Однако сравнительно низкая удельная теплоотдача с его поверхности традиционно требует создания значительной площади зеркала водоема.

Нам представляется, что с учетом существующих нормативных требований, для АСММ в северных регионах оптимальным будет использование оборотной схемы охлаждения с использованием «сухих» градирен аналогично Билибинской АЭС.

Однако также вполне очевидно, что технически наиболее простой и экономически наиболее выгодной является прямоточная схема с использованием естественного водоема (озера). В этом случае отсутствуют затраты на создание котлована (для искусственного водоема) или на сооружение дорогостоящих градирен. Как показали проведенные специалистами Института гидробиологии АН Украины [82] исследования экологического воздействия тепловых сбросов на водоемы-охладители (см. табл. 3.7), при нагреве воды в наиболее жаркую декаду на 0,5–1,5 °С воздействие на водоем будет слабым, т. е. характеризующимся незначительным изменением гидрохимического и гидробиологического режимов. Если принять во внимание тот аспект, что указанные исследования проводились для областей средней полосы и южных регионов, то для арктических регионов, где природа более ранима, в качестве граничного условия следует принять нижнее значение, т. е. 0,5 °С.

Таким образом, если площади поверхности относительно небольшого естественного водоема будет достаточно для того, чтобы при тепловом сбросе с АСММ нагрев воды не превысил 0,5 °С, то можно предложить сделать для АСММ исключение из Водного кодекса и разрешить использование прямоточной схемы охлаждения конденсаторов турбин. Далее представлены результаты оценки воздействия тепловых сбросов АСММ в водоем для линейки мощностей реакторных установок для определения минимально необходимой площади зеркала водоема, при которой будет выполняться указанный выше строгий критерий.

3.2.2. Оценка теплового воздействия АСММ на водоем-охладитель

Безусловно, наиболее простой схемой охлаждения конденсаторов турбин АЭС является проточная схема с использованием водоема-охладителя. В то же время подобная схема приводит к наибольшему тепловому воздействию на водоем. Как указывалось ранее, на сегодняшний день, согласно ст. 60 Водного кодекса РФ, использование подобных схем не разрешается. Вместе с тем для АСММ представляется интересным провести оценку минимально необходимых площадей водоема-охладителя, при которых тепловое воздействие на изменение гидрохимического и гидробиологического режимов водоема будет слабым или отсутствовать.

Как следует из данных табл. 3.7, воздействие можно считать достаточно слабым, если повышение температуры воды в водоеме-охладителе по сравнению с естественной температурой в наиболее жаркую декаду не превысит 0,5–1,5 °С. Примем для дальнейших консервативных оценок минимальное значение (0,5 °С), как граничное.

Для предварительных оценок температурного режима водоема-охладителя была использована методика, приведенная в «Методических указаниях по технологическим расчетам водоемов-охладителей» [93]. В частности, специалисты ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» утверждают, что максимальные летние средние по свободной поверхности (среднеповерхностная) температуры T_s воды могут быть определены по уравнению теплового баланса для установившегося режима, записанному в упрощенной форме с равновесной температурой T_p и дополненному соотношением суммарного коэффициента теплоотдачи α_Σ :

$$\alpha_\Sigma (T_s - T_p) - \frac{\Delta S}{\Omega} = 0,$$

$$\alpha_\Sigma = 3,3w_2 + 4,0(\Delta S / \Omega)^{1/3}$$

где α_Σ — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); w_2 — скорость ветра на высоте 2 м над свободной поверхностью водоема-охладителя, м/с; T_p — равновесная температура, К; Ω — площадь свободной поверхности водоема-охладителя, м²; $\Delta S = c_w \cdot \rho_w \cdot Q \cdot \Delta T$ — разность теплосодержаний поступающей в водоем и забираемой из него воды в единицу времени, Дж/с; c_w — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); ρ_w — плотность воды, кг/м³; Q — циркуляционный расход, м³/с, определяемый по изложенному ниже алгоритму; ΔT — температурный перепад поступающей в водоем и забираемый из него воды, принимаемый равным температурному перепаду на конденсаторах турбин, К.

Как видим, «рукотворными» исходными данными для расчета являются значения циркуляционного расхода Q и температурного перепада на конденсаторах турбины ΔT . Охлажденная вода в конденсаторах турбин обычно нагревается не более, чем на 15–20 °С, поскольку больший нагрев приводит к уменьшению вакуума в конденсаторе и существенному снижению КПД АСММ η [94]. Поэтому в наших оценках принята величина, равная 15 °С.

Циркуляционный расход определялся из баланса количества тепла, поступающего с паром в конденсаторы турбин, и количества тепла, уносимого подогретой охлаждающей водой. Заметим, что в рассматриваемом случае, количество тепла, поступающего с паром в конденсаторы турбин, эквивалентно введенной ранее величине ΔS . Как известно, сброс тепла в конденсаторы турбины B рассчитывается по формуле

$$B = N^{\text{th}} (1 - \eta) k,$$

где N^{th} — тепловая мощность реакторной установки; k — коэффициент, определяющий отношение тепловых сбросов в конденсаторы турбин ко всем тепловым потерям. Согласно рекомендациям, Т. Х. Маргуловой [79], значение коэффициента k принято равным 0,9.

Современные конденсационные АЭС с реакторами II и III поколений (PWR, BWR, ВВЭР, РБМК) имеют КПД на уровне 30–35 %. Для аппаратов со сверхкритическим давлением пара предполагается получение КПД до 45 %. Со снижением удельной мощности атомной станции, что характерно для АСММ, КПД при работе в конденсационном режиме снижается (примерно до 20 %). Однако при работе в теплофикационном режиме, что предусматривается для ряда населенных пунктов использования АСММ, КПД может быть существенно увеличен. На данном этапе исследований при отсутствии достаточных данных о проектных АСММ авторы монографии приняли решение использовать для проведения оценок два значения значения КПД: минимальное — 20 % и максимальное 35 %.

Количество тепла G_w , уносимого подогретой водой в единицу времени, определяется формулой

$$G_w = Q \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T .$$

Приравнявая B и G_w , получаем

$$Q = N^{\text{th}} \cdot (1 - \eta) \cdot k / (c_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T) .$$

Поскольку авторами монографии рассматривается использование АСММ в районах Крайнего Севера (например, географические координаты центра комплексного редкоземельного месторождения Томтор: 71,0° с. ш., 116,5° в. д.), то расчетные оценки зависимости температуры водоема-охладителя от площади его поверхности и тепловой мощности РУ АСММ были проведены для метеорологических условий якутского населенного пункта Саскылах (71,5° с. ш., 114° в. д.). Именно там расположена ближайшая к Томторскому месторождению метеорологическая станция. В соответствии с данными приложения документа [93] указанный район в июле характеризуется следующими значениями метеорологических параметров $T_p = 15,5$ °С и $w_2 = 3,6$ м/с.

Следует отметить, что, как видно из указанных географических координат месторождения и населенного пункта, данные метеорологической станции могут быть использованы только для выполнения предварительных оценок среднеповерхностной температуры водоема-охладителя. Дело в том, что, согласно требованиям СНиПа 23-01-99 «Строительная климатология» [95], в случае отсутствия климатических параметров непосредственно для района строительства объекта следует принимать значения климатических параметров ближайшего к нему пункта, расположенного в местности с аналогичными условиями, но не более чем на 50 км. В нашем случае это требование не выполняется!

В произведенных расчетах тепловая мощность РУ АСММ и площадь поверхности водоема-охладителя проварьированы в диапазонах 0,5–500 МВт и 0,01–7,5 км² соответственно. В качестве примера в табл. 3.8 для минимального и максимального значения КПД представлены результаты расчетов среднеповерхностной температуры при значениях тепловой мощности РУ АСММ до 100 МВт. В таблице затемнены клетки, в которых прогнозные значения среднеповерхностной температуры выше естественной более чем на 0,5 °С, что выше принятого нами граничного значения, а светлыми оставлены клетки, значения в которых соответствуют принятому критерию.

Таблица 3.8

Расчетные значения среднеповерхностной температуры воды, °С

Поверхность водоема, м ²	Тепловая мощность РУ АСММ, МВт					
	0,5	1,0	5,0	10,0	50,0	100,0
КПД 20 %						
1,0·10 ⁴	16,9	18,0	24,4	30,6	64,8	96,5
2,5·10 ⁴	16,2	16,7	19,9	23,0	40,8	57,5
5,0·10 ⁴	15,9	16,2	18,0	19,9	30,6	40,8
7,5·10 ⁴	15,8	16,0	17,3	18,7	26,6	34,2
1,0·10 ⁵	15,7	15,9	16,9	18,0	24,4	30,6
2,5·10 ⁵	15,6	15,7	16,2	16,7	19,9	23,0
5,0·10 ⁵	15,5	15,6	15,9	16,2	18,0	19,9
7,5·10 ⁵	15,5	15,6	15,8	16,0	17,3	18,7
1,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,7	15,9	16,9	18,0
1,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,8	16,5	17,3
2,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,7	16,3	16,9
2,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,7	16,2	16,7
3,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	16,1	16,5
3,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	16,0	16,4
4,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	15,9	16,3
4,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	15,9	16,2
5,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,9	16,2
5,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,1
6,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,1
6,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,0
КПД 35 %						
1,0·10 ⁴	16,7	17,6	23,1	28,4	57,9	85,4
2,5·10 ⁴	16,1	16,5	19,2	21,9	37,2	51,6
5,0·10 ⁴	15,8	16,1	17,6	19,2	28,4	37,2
7,5·10 ⁴	15,7	15,9	17,0	18,2	25,0	31,5
1,0·10 ⁵	15,7	15,8	16,7	17,6	23,1	28,4
2,5·10 ⁵	15,6	15,6	16,1	16,5	19,2	21,9
5,0·10 ⁵	15,5	15,6	15,8	16,1	17,6	19,2
7,5·10 ⁵	15,5	15,6	15,7	15,9	17,0	18,2
1,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,7	15,8	16,7	17,6
1,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,7	16,4	17,0
2,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,7	16,2	16,7
2,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	16,1	16,5
3,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	16,0	16,4
3,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,6	15,6	15,9	16,3
4,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,9	16,2
4,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,1
5,0·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,1
5,5·10 ⁶	15,5	15,5	15,5	15,6	15,8	16,0

Как видно из данных табл. 3.8, для РУ АСММ с тепловой мощностью до 10 МВт изменений в значениях площади водоема-охладителя, которые обеспечивают неперевышение принятого критерия, не прогнозируется. Для РУ АСММ с тепловой мощностью 50 и 100 МВт эксплуатация в конденсационном режиме (КПД 20 %) приводит к росту площади водоема-охладителя на 0,5 и 1,0 км² соответственно.

Выполненные оценки среднеповерхностной температуры воды для малых водоемов-охладителей (в диапазоне площади поверхности 10⁴–10⁶ м²) можно рассматривать как обоснование предложения по созданию искусственного водоема, использование которого в качестве охладителя не будет противоречить ст. 60 Водного кодекса РФ. Кроме того, на рис. 3.21 приведены графики зависимости среднеповерхностной температуры воды от площади поверхности водоема при вариации тепловой мощности РУ АСММ (КПД 35 %).

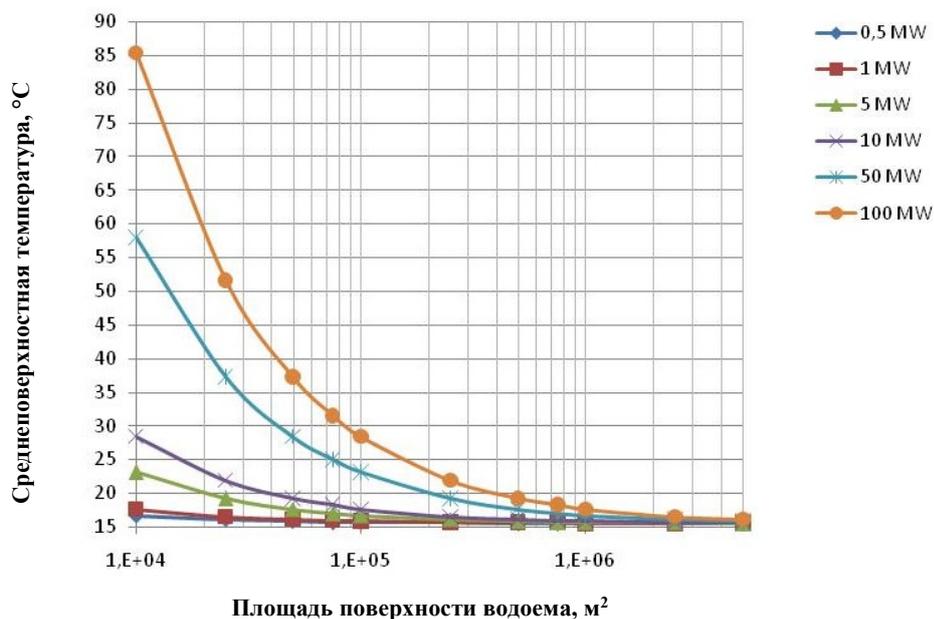


Рис. 3.21. График зависимости среднеповерхностной температуры воды водоема-охладителя от площади поверхности водоема и тепловой мощности РУ АСММ

С коэффициентами достоверности в диапазоне значений 0,687–0,885 графические зависимости (рис. 3.21) описываются степенной функцией вида $T_s(S_w, N^{th}) = A(N^{th}) \cdot S_w^{-B(N^{th})}$. В свою очередь, коэффициенты $A(N^{th})$ и $B(N^{th})$ степенной функции аппроксимируются с коэффициентами достоверности 1,0 и 0,987 соответственно, квадратичными функциями тепловой мощности РУ температуры воды как функции двух переменных — площади поверхности водоема и тепловой мощности РУ АСММ в диапазоне значений, указанном в табл. 3.9, в форме

$$T_s(S_w, N^{th}) = (0,033N^{th} \cdot N^{th} + 3,004N^{th} + 16,46) S_w^{(0,00003N^{th} \cdot N^{th} - 0,004N^{th} - 0,016)}.$$

Таблица 3.9

Площади поверхности водоема-охладителя S_w и тепловые мощности РУ АСММ для условия непревышения подогрева воды на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КПД 35 % и климатические условия северо-востока РФ)

N^{th} , МВт	S_w , м^2
0,5	$3,0 \cdot 10^4$
1,0	$6,0 \cdot 10^4$
5,0	$3,0 \cdot 10^5$
10,0	$6,0 \cdot 10^5$
50,0	$3,0 \cdot 10^6$
100,0	$6,0 \cdot 10^6$

Анализ полученных расчетных данных позволяет для принятых климатических условий районов северо-востока РФ определить минимально необходимые площади поверхности водоема-охладителя для мощностного ряда РУ АСММ, при которых выполняется условие непревышения подогрева воды на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 3.9). В этом случае имеем простую линейную зависимость $S_w = 6 \cdot 10^4 \cdot N^{\text{th}}$, позволяющую выполнять прогнозные оценки минимально необходимых площадей поверхности водоема-охладителя для мощностного ряда РУ АСММ из диапазона значений, приведенного в табл. 3.8.

Что касается больших мощностей, при которых для соблюдения условия непревышения температуры воды более чем на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ нужны водоемы площадью поверхности более чем несколько квадратных километров, то для них необходимо использование других схем сброса тепла, с учетом опыта эксплуатации прежде всего Билибинской АЭС.

Как следует из приведенных результатов, для мощностей РУ АСММ не более 10 МВт (тепл.), чтобы охлаждать конденсаторы турбин, при условии практического отсутствия негативного влияния на водоем достаточно иметь площади поверхности водоема, не превышающие 1 км^2 . В связи с этим предлагается целесообразным для РУ АСММ мощностью до 10 МВт (тепл.) сделать исключение и без сооружения искусственного водоема-охладителя разрешить использовать прямоточную схему сброса тепла в малые природные водоемы, что не повлечет негативных экологических последствий, но может существенно удешевить сооружение, эксплуатацию и последующий вывод из эксплуатации АСММ.

3.3. Оценка радиационного воздействия АСММ на окружающую среду при запроектной аварии

При проведении исследований по оценке радиационного воздействия авторы не ставили своей целью анализ процессов протекания аварии на АСММ. Предполагалось, что подземное размещение АСММ гарантирует сохранность защитных барьеров, а радиоактивные выбросы будут поступать через вентиляционную систему. Основной задачей являлась оценка радиоактивного загрязнения природной среды для выбранной площадки размещения АСММ (пос. Весенний, Песчанка) и дозовых нагрузок на население при выбросах

с АСММ при запроектной аварии. Оценки проводились на примере реакторной установки КЛТ-40С, для которой имеются данные по протеканию запроектной аварии внутри реакторной установки [96, 97].

3.3.1. Методология исследований

Радиационная безопасность РУ считается достаточной, если соблюдаются требования НРБ-99/2009 [98], ОСПОРБ-99/2010 [99] и СП АС-03 [100]. По отношению к окружающей среде основной критерий радиационной безопасности сводится к предельно допустимым нормам выбросов в вентиляционный центр и сбросов на очистные сооружения. Для рассматриваемой установки КЛТ-40С, по утверждению авторов работы [98], поступление в окружающую среду жидких отходов исключено. Поэтому загрязнение будет происходить только за счет вентиляционных газообразных выбросов.

Оценки протекания аварийных процессов на установке КЛТ-40С, выполненные как ее разработчиками [97], так и авторами работы [96], показали, что при любых запроектных авариях теплоноситель будет локализован и загрязнение окружающей среды будет происходить за счет паровоздушного выброса в атмосферу через вентиляционную трубу.

Для оценки последствий аварии использовались наиболее неблагоприятные метеорологические условия:

- скорость ветра 2 м/с, категория устойчивости атмосферы F;
- высота выброса варьировалась от 20 до 100 м.

Для рассматриваемого выброса предполагалось, что выброс происходит в одном направлении на протяжении всего времени истечения радиоактивности. Распространение радиоактивных выбросов в атмосфере и индивидуальная доза облучения населения рассчитывались в два этапа.

На 1-м этапе с использованием в качестве исходных данных параметров выброса при запроектной аварии, обусловленной разрывом трубопровода-коллектора парогенератора по причине незакрытия локализирующей арматуры 2-го контура [96] (см. табл. 3.10), и программного кода МАССС [101] вычислялись:

- временной интеграл концентрации на фиксированном расстоянии от источника выброса (C), Бк·с/м³;
- кратковременный фактор метеорологического разбавления (χ), с/м³;
- поверхностное загрязнение на фиксированном расстоянии от источника выброса с учетом факторов осаждения и вымывания (C_s), Бк/м².

На 2-м этапе с помощью собственной программы выполнена оценка среднегодовой эффективной дозы для населения, при этом учитывались следующие пути воздействия [102, 103]:

- внешнее облучение от проходящего радиоактивного облака;
- внешнее облучение от загрязненной радионуклидами поверхности земли в течение первого года после аварии;
- внутреннее облучение от вдыхания радионуклидов в облаке (ингаляция).

В выполненных оценках население не разделялось, как того требуют рекомендации МАГАТЭ, на возрастные группы. Оценки выполнялись для взрослого населения с учетом следующих показателей:

- дозовые факторы конверсии (дозовые коэффициенты) при облучении в результате ингаляции (см. табл. 3.10) и годовой объем вдыхаемого воздуха;
- дозовые факторы конверсии внешнего облучения от облака и почвы (см. табл. 3.10).

Таблица 3.10

Состав выброса и высвобождаемая активность при запроектной аварии, дозовые коэффициенты при внешнем облучении от облака и поверхности земли и при внутреннем облучении при ингаляции

№ п/п	Радионуклид	Высвобождаемая активность, ГБк	R^{cloud} , Зв·м ² /(Бк·с)	R^{surf} , Зв·м ² /(Бк·с)	R^{inh} , Зв/Бк
1	Ar-41	81,0	$8,67 \cdot 10^{-14}$	–	–
2	Kr-85m	510,0	$1,06 \cdot 10^{-14}$	–	–
3	Kr-87	1000,0	$5,24 \cdot 10^{-14}$	–	–
4	Kr-88	1200,0	$1,37 \cdot 10^{-13}$	–	–
5	Xe-133	2800,0	$3,24 \cdot 10^{-15}$	–	–
6	Xe-135	3000,0	$1,65 \cdot 10^{-14}$	–	–
7	Xe-138	1800,0	$7,24 \cdot 10^{-14}$	–	–
8	I-131	6,03	$2,57 \cdot 10^{-14}$	$0,38 \cdot 10^{-15}$	$0,88 \cdot 10^{-8}$
9	I-132	205,0	$1,54 \cdot 10^{-13}$	$0,20 \cdot 10^{-14}$	$0,91 \cdot 10^{-10}$
10	I-133	86,1	$4,00 \cdot 10^{-14}$	$0,56 \cdot 10^{-15}$	$0,15 \cdot 10^{-8}$
11	I-134	400,0	$1,74 \cdot 10^{-13}$	$0,22 \cdot 10^{-14}$	$0,30 \cdot 10^{-10}$
12	I-135	161,0	$1,12 \cdot 10^{-13}$	$0,13 \cdot 10^{-14}$	$0,30 \cdot 10^{-9}$
13	Cs-134	0,20	$1,05 \cdot 10^{-13}$	$0,14 \cdot 10^{-14}$	$0,13 \cdot 10^{-7}$
14	Cs-137	0,41	$3,81 \cdot 10^{-14}$	$0,53 \cdot 10^{-15}$	$0,87 \cdot 10^{-8}$

Расчетные формулы, используемые в собственной программе, соответствуют выражениям, представленным в работе [102], в частности:

- внешнее облучение от облака вычисляется по формуле

$$H^{cloud} = Q \cdot \chi \cdot R^{cloud},$$

где Q — суммарный выброс радионуклида, Бк; R^{cloud} — дозовый коэффициент облучения от полубесконечного облака, Зв·м²/(Бк·с) (для радионуклидов с номерами 1–12 в табл. 3.10 заимствован из табл. 21.3 работы [103]; для радионуклидов с номерами 13–14 в табл. 3.11 вычислен по формуле $R^{cloud} = 6,75 \cdot 10^{-14} \cdot E$, где E — энергетический выход всех фотонов на распад, МэВ/расп. (заимствован из справочника [104]));

- внешнее облучение от загрязненной поверхности земли вычисляется по формуле

$$H^{surf} = C_s \cdot K \cdot R^{surf},$$

где K — поправочный коэффициент на процессы накопления и выведения радионуклида из почвы, с (формула (5.27) работы [102]); R^{surf} — дозовый коэффициент внешнего облучения от загрязненной поверхности земли на высоте 1 м Зв·м²/(Бк·с) (заимствован из табл. 5.10 работы [102]);

- внутреннее облучение за счет ингаляции вычисляется по формуле

$$H^{\text{inh}} = C \cdot k^a \cdot V^a \cdot R^{\text{inh}},$$

где k^a — поправочный коэффициент увеличения дозы при ингаляции с уменьшением возраста человек (заимствован из табл. 2.9 работы [102]); V^a — скорость дыхания для лиц возрастной группы a , м³/с (заимствован из табл. 2.8 работы [102]); R^{inh} — дозовый коэффициент при ингаляции, Зв/Бк (заимствован из табл. 2.5 работы [102]).

В расчетах не принимался путь воздействия, связанный с внутренним облучением за счет потребления загрязненных продуктов питания. Предполагается, что в районах потенциального размещения АСММ все продукты питания являются привозными.

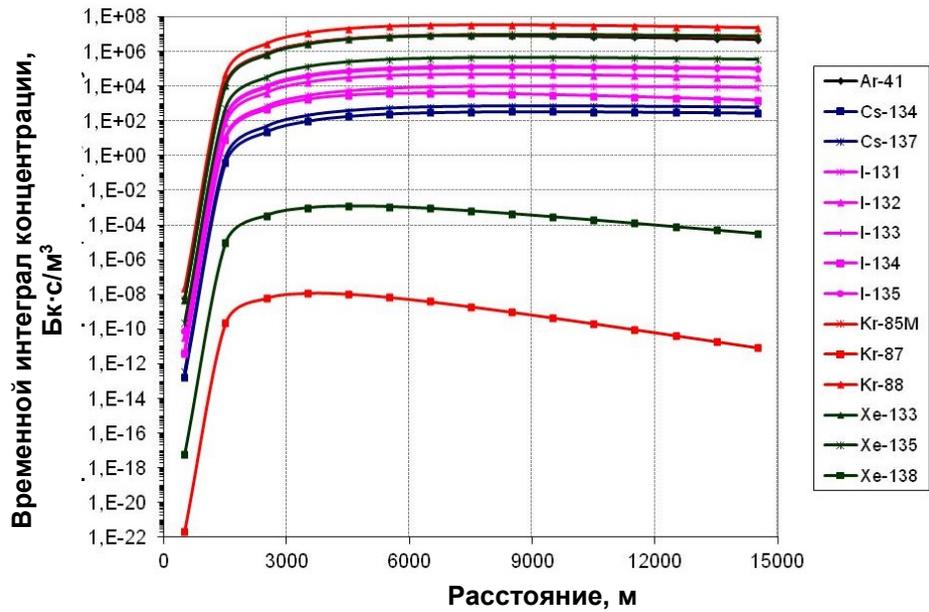
3.3.2. Оценка радиоактивного загрязнения площадки размещения АСММ и дозовых нагрузок на население

Достаточно интересными результатами являются пространственные распределения по отдельным радионуклидам (см. табл. 3.10) как приземной концентрации, так и поверхностного загрязнения земли при вариации высоты вентиляционной трубы (100 и 20 м). На рис. 3.22 представлены результаты расчетов приземной концентрации, на рис. 3.23 — поверхностного загрязнения земли для пос. Весенний. Расчеты выполнены по программе МАССС.

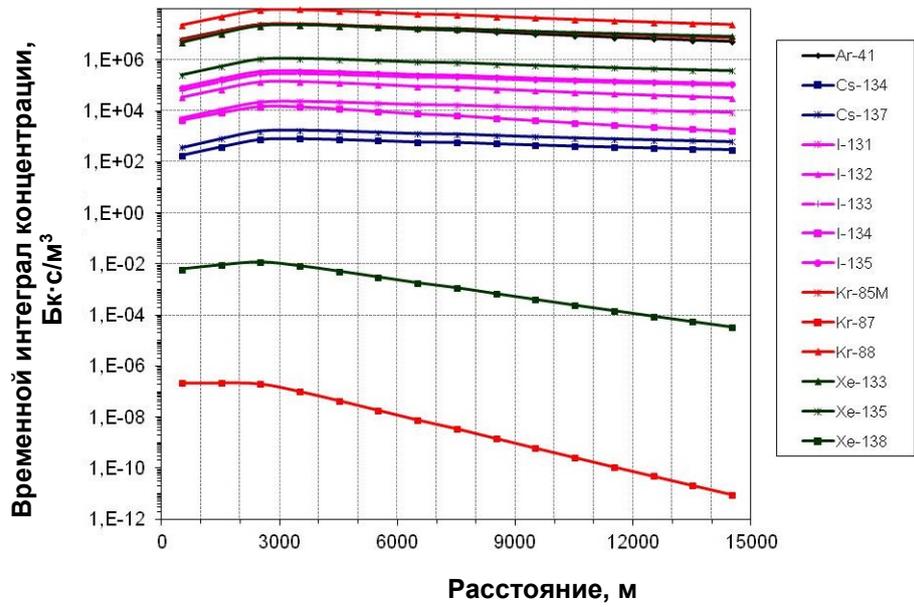
Для временного интеграла приземной концентрации рассмотрим очевидные эффекты высоты выброса на примере двух радионуклидов — Кr-88 и Кr-87. Первый радионуклид является «лидером», второй — «аутсайдером» по вкладу в анализируемую величину. В частности, для радионуклида-«лидера» характерны следующие моменты:

- изменение расстояния, отвечающего максимальному значению приземной концентрации (порядка 8000 м для «высокого» выброса и около 3000 м для «низкого»);
- само максимальное значение временного интеграла концентрации при «низком» выбросе отчетливо больше (на уровне 10^8 Бк·с/м³), чем при «высоком» (на уровне $6 \cdot 10^7$ Бк·с/м³);
- различный характер поведения кривых на малых расстояниях. В частности, при высоте выброса 20 м уже в ближайшей расчетной точке значения временного интеграла концентрации являются значимыми (на уровне $2 \cdot 10^7$ Бк·с/м³), тогда как при «высоком» выбросе анализируемый параметр существенно (на много порядков) меньше (на уровне 10^{-8} Бк·с/м³).

Для пространственного распределения поверхностного загрязнения рассмотрим некоторые особенности поведения графиков также на примере двух осаждающихся радионуклидов — I-135 и I-134. Из изотопов йода первый радионуклид является «лидером», второй — «аутсайдером» по вкладу в анализируемую величину. Для абсолютно всех представленных на рис. 3.23 графических зависимостей характерно монотонное убывание, но с различным углом наклона (минимальным для радионуклида-«лидера» и максимальным для радионуклида-«аутайдера»). Максимальное значение поверхностного загрязнения, естественно, прогнозируется в ближайшей расчетной точке, при этом высота выброса достаточно слабо влияет на значение максимального значения (для I-135 — $\sim 2,2 \cdot 10^3$ Бк/м², для I-134 — $\sim 1,2 \cdot 10^2$ Бк/м²).

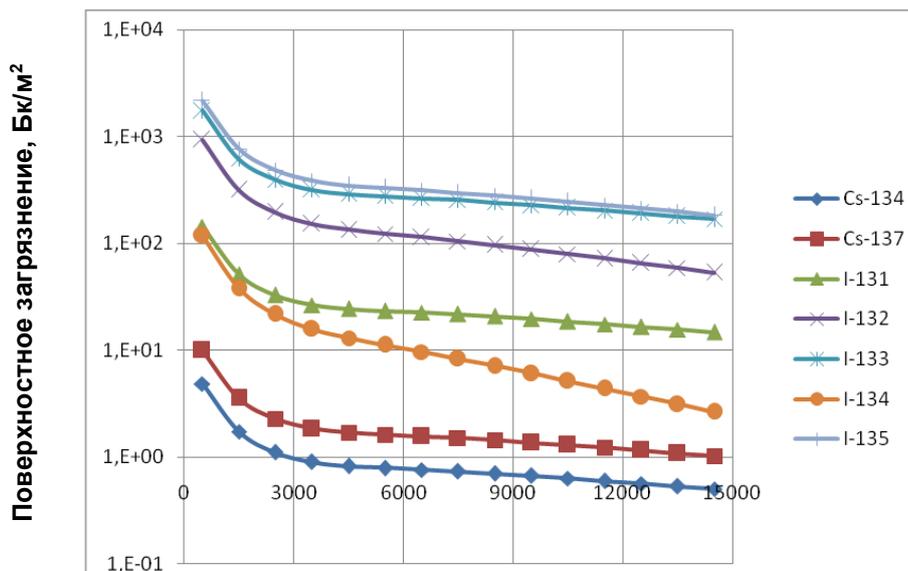


a

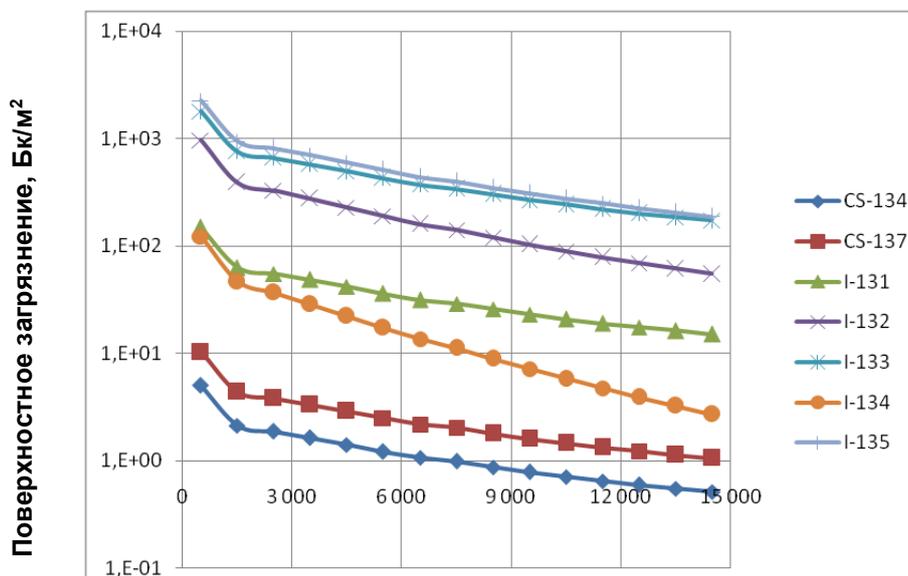


б

Рис. 3.22. Пространственное распределение приземной концентрации для пос. Весенний при вариации высоты вентиляционной трубы 100 м (*a*) и 20 м (*б*)



a



Расстояние, м

б

Рис. 3.23. Пространственное распределение поверхностного загрязнения земли для пос. Весенний при вариации высоты вентиляционной трубы 100 м (*a*) и 20 м (*б*)

Результаты оценки пространственного распределения среднегодовой эффективной дозы для населения пос. Весенний при вариации высоты вентиляционной трубы — 100 и 20 м представлены на рис. 3.24, *a* и *б* соответственно. Отдельно рассчитывается каждая траектория облучения и их суммарное воздействие.

Как видно из представленных результатов расчетов среднегодовых эффективных доз, при высоте выброса 100 м на небольших расстояниях (около 1 км) определяющим будет внешнее облучение от выпавших радиоактивных осадков, на всех остальных расстояниях — внешнее облучение от проходящего облака. При этом максимальное суммарное значение среднегодовой эффективной дозы будет достигаться на расстоянии ~ 8 км и не превышать уровень 10 мкЗв/год.

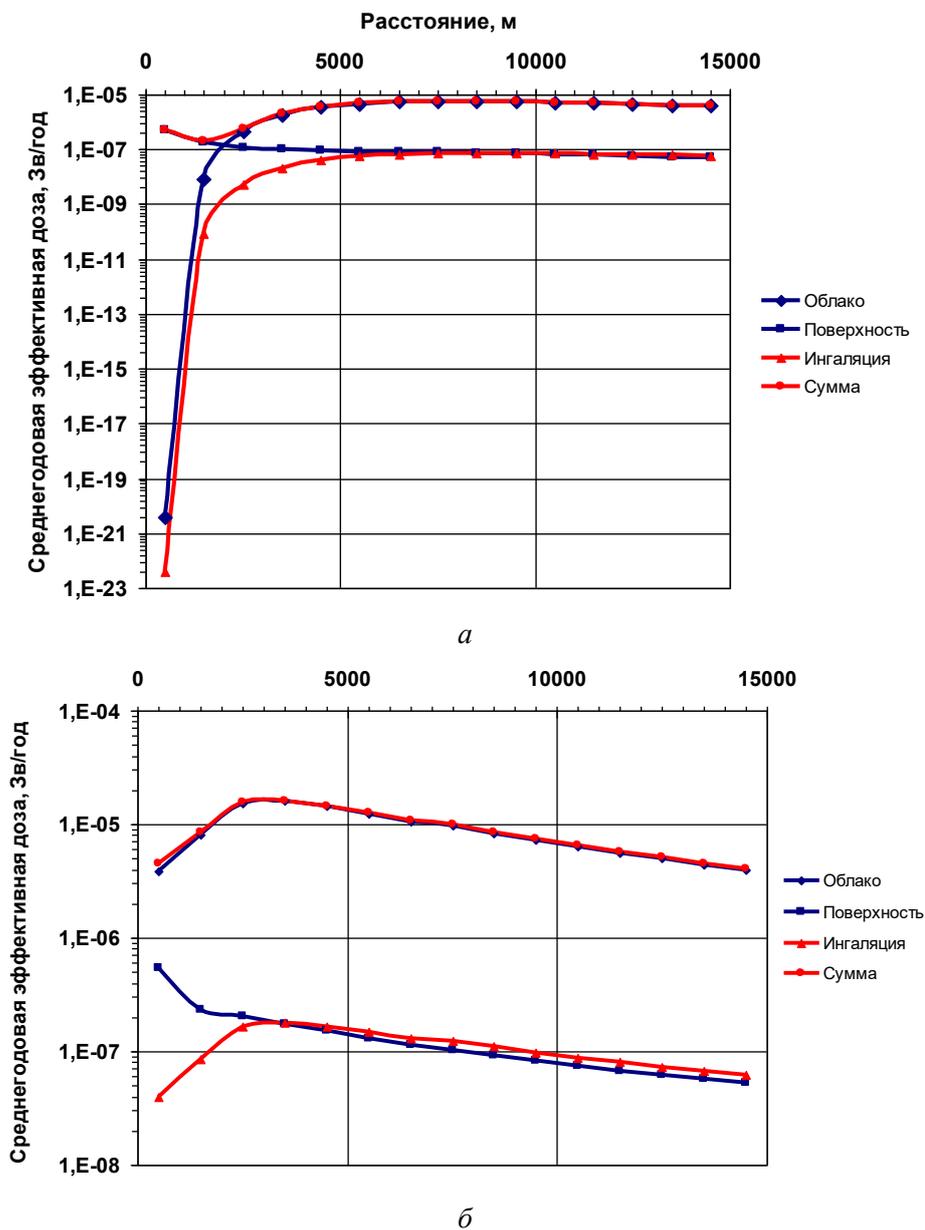


Рис. 3.24. Пространственное распределение среднегодовой эффективной дозы для пос. Весенний при вариации высоты вентиляционной трубы 100 м (а) и 20 м (б)

При высоте выброса 20 м определяющим на всех расстояниях будет внешнее облучение от проходящего облака, пик суммарного значения среднегодовой эффективной дозы сдвигается на расстояние ~ 3 км и увеличивается до ~ 20 мкЗв/год. Представляется, что полученный результат физичен. Действительно, более высокий выброс должен приводить к увеличению области загрязнения.

Учитывая, что для запроектной аварии величина дозы облучения на границах санитарно-защитной зоны допускается 5 мЗв/год [98], можно с уверенностью говорить о безопасности рассматриваемой АСММ. При этом можно утверждать, что санитарно-защитная зона может быть ограничена размерами промышленной площадки при незначительной (около 20 м) высоте вентиляционной трубы.

Выводы по главе 3

1. Основные результаты исследований по оценке теплового воздействия атомной станции малой мощности на вмещающий массив многолетнемерзлых пород при подземном размещении объекта могут быть сформулированы следующим образом.

1.1. Создана трехмерная компьютерная модель процессов теплопереноса в криолитозоне с учетом фазового перехода «лед — вода» при размещении в ММГП модулей АСММ в форме выработок большого объема и многомодульной подземной АСММ. Разработанные модели позволили выполнить симуляцию переноса тепла в криолитозоне при фиксированном значении температуры в модулях АСММ на уровне 20 °С и при вариации коэффициента теплопроводности обделки с 2 до $0,05$ Вт/(м·К), а также пористости ММГП (5–15 %).

1.2. На базе численного моделирования в объемной постановке реализован и апробирован методический подход, позволяющий выполнять достаточно строгие оценки некоторых параметров областей оттаивания, которые возникают в криолитозоне при размещении в ней источников тепловыделений (подземная АСММ, объекты подземного хранения/захоронения опасных тепловыделяющих отходов и др.). В основе оценки объема области оттаивания лежит интегрирование теплофизических параметров в объеме криолитозоны, а также известные различия в их значениях для воды и льда.

На примере варианта многомодульной подземной АСММ при фиксированных параметрах модели (температура внутри модулей, коэффициент теплопроводности обделки и др.) выполнена оценка (в форме аналитических зависимостей) динамики объема оттаявшей породы и скорости объема оттаявших многолетнемерзлых пород при вариации пористости криолитозоны. Полученные результаты свидетельствуют: минимальному значению пористости соответствуют максимальные величины объема оттаявшей породы, что не противоречит физике процесса.

1.3. По результатам исследований оптимизации компоновочных решений подземного комплекса атомной станции малой мощности и способов управления техногенными воздействиями на вмещающий массив» получены следующие результаты:

1.3.1. Выполнена оценка толщины слоя криолитозоны с температурой ниже температуры фазового перехода «лед — вода» в зависимости от расстояния между модулями и пористости вмещающего массива.

Прогнозируется смыкание оттаявшей породы в зависимости от пористости ММГП через 4–6 лет функционирования АСММ при расстоянии между центрами модулей 25 м.

Показано, что в течение 12-летнего периода сохранность ММГП обеспечивается при расстоянии между центрами модулей 30 м независимо от величины пористости криолитозоны, однако временной «запас» сохранности криолитозоны невелик (5–6 лет).

Доказана безусловная долговременная сохранность многолетнемерзлых горных пород независимо от величины пористости криолитозоны для расстояний между центрами модулей 40 м и более.

1.3.2. Исследовано влияние площади грани модуля (основание подземной выработки) на глубину оттаивания криолитозоны на примере РО и ТО реакторных установок АБВ-6 и СВБР-100:

- минимальный объем оттаявшей породы обеспечивается максимально компактным размещением реакторного и турбинного отделений;
- глубина оттаивания криолитозоны нелинейным образом зависит от площади граней модулей. В течение 20 лет эксплуатации АСММ в интервале площадей оснований 250–3000 м² прогнозируется диапазон глубины оттаивания от 10 до 20 м. В первом приближении для описания нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади граней модулей подходит логарифмическая функция.

1.3.3. Рассмотрены примеры схем замораживания массива для обеспечения стабильности ММГП и исследовано применение встроенных систем замораживания, направленное на обеспечения тепловой безопасности подземной АСММ.

На базе реализованных в двухмерной постановке компьютерных моделей продемонстрированы принципиальные схемы искусственного замораживания массива с внешней стороны модулей, в результате чего вмещающий массив практически восстанавливает свои природные показатели по температурным распределениям, а значит, и по своей стабильности.

Методами численного моделирования в двухмерной постановке продемонстрированы принципиальные схемы искусственного замораживания вмещающего массива посредством применения встроенной в обделку модуля системы труб охлаждения. Определены количество и размеры труб охлаждения, а также температура хладоносителя, практически обеспечивающие природные показатели вмещающего массива по температурным распределениям, а значит, по его прочности и стабильности при заданных параметрах вмещающего массива и модуля (размеры, теплофизические параметры).

2. По результатам оценки минимально необходимых площадей водоема-охладителя, при которых тепловое воздействие на изменение гидрохимического и гидробиологического режимов водоема будет слабым или отсутствовать, получены следующие основные результаты:

2.1. Установлено, что для мощностей РУ АСММ не более 10 МВт (тепл.), для охлаждения конденсаторов турбин при условии практического отсутствия негативного влияния на водоем достаточно иметь площади поверхности водоема, не превышающие 1 км². В связи с этим для РУ АСММ мощностью до 10 МВт (тепл.) предложено сделать исключение из Водного кодекса и без сооружения искусственного водоема-охладителя разрешить использовать прямоточную

схему сброса тепла в малые природные водоемы, что не повлечет негативных экологических последствий, но может существенно удешевить сооружение, эксплуатацию и последующий вывод из эксплуатации АСММ.

2.2. Выполненные оценки среднеповерхностной температуры воды для малых водоемов-охладителей (в диапазоне площади поверхности 10^4 – 10^6 м²) можно рассматривать как предложение по созданию искусственного водоема, использование которого в качестве охладителя не будет противоречить ст. 60 Водного кодекса РФ.

Что касается больших мощностей, при которых для соблюдения условия непревышения температуры воды более чем на 0,5 °С нужны водоемы с площадью поверхности более чем несколько квадратных километров, то для них необходимо использование других схем сброса тепла, в первую очередь с учетом опыта эксплуатации Билибинской АЭС.

3. По результатам оценки радиационного воздействия на население и природную среду при аварийном атмосферном выбросе на АСММ с РУ КЛТ-40С, выполненной для метеорологических условий месторождения Песчанка, сделан вывод о том, что размеры санитарно-защитной зоны, на границах которой выполняется требование непревышения допустимой дозы для населения при запроектной аварии, не превысят размеров промышленной площадки АСММ. При этом в случае отсутствия эффекта экранирования близлежащих зданий высота вентиляционной трубы может быть существенно снижена (до ~ 20 м).

Литература к главе 3

1. Экологические аспекты безопасности подземной атомной станции малой мощности в условиях Арктики / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. Г. Климин, Н. В. Новожилова. Ярославль : Принтхаус-Ярославль, 2018. 170 с.
2. Мясоедов, Б. Ф. Проблемы радиоактивного загрязнения некоторых районов России / Б. Ф. Мясоедов // Геоэкология. 1997. № 4. С. 3–18.
3. Бадяев, В. В. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС / В. В. Бадяев, Ю. А. Егоров, С. В. Казаков. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 221 с.
4. Крышев, И. И. Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС / И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 184 с.
5. Радиация. Дозы, эффекты, риск / перевод с английского Ю. А. Банникова. Москва : Мир, 1990. 79 с.
6. Влияние радиоактивных выбросов уранодобывающего и перерабатывающего производств ОАО «ППГХО» на население и биоту / И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина, А. И. Крышев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 2. С.173–177.
7. Обеспечение радиационной безопасности человека и природной среды на всех этапах жизненного цикла плавучих атомных теплоэлектростанций / Ю. Е. Горлинский, В. А. Кутьков, В. Н. Лысцов [и др.] // Атомная энергия. 2009. Т. 107, вып. 2. С. 95–103.
8. Крышев, И. И. Оценка воздействия на окружающую среду выбросов и сбросов радионуклидов / И. И. Крышев, А. И. Крышев, М. А. Скакунова // Атомная энергия. 2012. Т. 115, вып. 1. С. 47–52.
9. Крышев, И. И. Оценка ущерба окружающей среде при использовании атомной энергии / И. И. Крышев, Л. А. Курындина, И. М. Линге // Атомная энергия. 2014. Т. 117, вып. 2. С. 159–163.

10. *Крышев, И. И.* Атомная энергетика и биосфера / И. И. Крышев, Е. П. Рязанцев // Вестник АН СССР. 1991. № 2. С. 39–52.
11. *Молоков, Л. А.* Взаимодействие инженерных сооружений с геологической средой / Л. А. Молоков. Москва : Недра, 1988. 222 с.
12. *Попов, И. В.* Задачи и методы долгосрочного прогноза инженерно-геологических условий / И. В. Попов, Г. К. Бондарик, Л. Б. Розовский // Рациональное использование земной коры. Москва, 1974. С. 51–60.
13. *Маслов, Н. Н.* Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н. Н. Маслов. Москва : Высш. шк., 1982. 511 с.
14. *Сергеев, Е. М.* Воздействие человека на литосферу и задачи инженерной геологии / Е. М. Сергеев // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. 1982. Вып. 5. С. 4–15.
15. *Белый, Л. Д.* Проблемы рационального использования и охраны геологической среды при гидротехническом строительстве / Л. Д. Белый // Инженерно-геологические аспекты рационального использования и охраны геологической среды. Москва : Наука, 1981. С. 174–185.
16. *Рац, М. В.* Структурные модели в инженерной геологии / М. В. Рац. Москва : Недра, 1972. 215 с.
17. *Ломтадзе, В. Д.* Инженерная геология. Инженерная геодинамика / В. Д. Ломтадзе. Ленинград : Недра, 1977. 479 с.
18. *Бондарик, Г. К.* Общая теория инженерной (физической) геологии / Г. К. Бондарик. Москва : Недра, 1981. 256 с.
19. *Куликова, Е. Ю.* Подземная геоэкология мегаполисов / Е. Ю. Куликова. Москва : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. 480 с.
20. *Куликова, Е. Ю.* Источники, виды и характер воздействия коммунальных тоннелей на окружающую среду / Е. Ю. Куликова // ГИАБ. 2004. № 4. С. 31–37.
21. *Куликова, Е. Ю.* Выработка критериев экологической безопасности применения технологий и способов строительства коммунальных подземных сооружений / Е. Ю. Куликова // ГИАБ. 2002. № 1. С. 49–52.
22. *Бессолов, П. П.* Современные направления использования подземного пространства / П. П. Бессолов // Шахтное строительство. 1989. № 5. С. 27–31.
23. *Зильберборд, А. Ф.* Тепловой режим подземных сооружений и инженерно-геологические условия их оптимального размещения / А. Ф. Зильберборд, Г. С. Горская, М. А. Городецкая. Москва : ВСЕГИНГЕО, 1977. 151 с.
24. *Зильберборд, А. Ф.* Инженерно-геологические предпосылки использования подземных емкостей для хранения продовольствия размещения / А. Ф. Зильберборд, Г. С. Горская. Москва : ВСЕГИНГЕО, 1970. 79 с.
25. *Петренко, Е. В.* Освоение подземного пространства / Е. В. Петренко. Москва : Недра, 1988. 150 с.
26. *Сегединов, А. А.* Многоярусный город / А. А. Сегединов. Москва : Московский рабочий, 1981. 166 с.
27. *Мазур, И. И.*, *Инженерная экология* / И. И. Мазур, О. И. Молдованов, В. Н. Шишов. Москва : Высш. шк., 1996. 637 с.
28. Практическое руководство по производству тепловых расчетов оснований в районах с вечнемерзлыми грунтами / Красноярский Промстройиниипроект. Красноярск, 1976. 30 с.
29. *Иванов, Н. С.* Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах / Н. С. Иванов. Москва : Наука, 1969. 240 с.

30. *Порхаев, Г. В.* Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномёрзлыми грунтами / Г. В. Порхаев. Москва : Наука, 1970. 208 с.
31. Инженерная геокриология : справочное пособие / Э. Д. Ершов, Л. Н. Хрусталева, Г. И. Дубиков, С. Ю. Пармузин ; под редакцией Э. Д. Ершова. Москва : Недра, 1991. 439 с.
32. *Вялов, С. С.* Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. Москва : Стройиздат, 2000. 464 с.
33. *Фельдман, Г. М.* Методические указания по расчетам температурного режима грунтов / Г. М. Фельдман. Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. 70 с.
34. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии / К. Ф. Войтковский, П. И. Мельников, Г. В. Порхаев, И. Н. Вотяков. Москва : Наука, 1968. 199 с.
35. *Мельников, В. П.* Электрофизические исследования мерзлых пород / В. П. Мельников. Новосибирск : Наука, 1977. 108 с.
36. *Фельдман, Г. М.* Прогноз температурного режима грунтов и развитие криогенных процессов / Г. М. Фельдман. Новосибирск : Наука, 1977. 191 с.
37. *Демченко, Р. Я.* Расчеты оттаивания и промерзания в основаниях зданий на многолетнемерзлых грунтах / Р. Я. Демченко ; ИМЗ СО АН СССР. Якутск, 1986. 88 с.
38. Кузьмин Г. П., Подземные резервуары в мерзлых грунтах / Г. П. Кузьмин, А. В. Яковлев ; ИМЗ СО РАН. Якутск, 1992. 152 с.
39. *Растегаев, И. К.* Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И. К. Растегаев. Новосибирск : Наука, 1992. 351 с.
40. СНиП 2.02.04–88. Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах / Государственный строительный комитет СССР. Москва, 1990. 72 с.
41. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. ТСН 31-323-2002 Республики Саха (Якутия) / Министерство строительства и архитектуры Республики Саха (Якутия). Якутск, 2002. 66 с. Текст : электронный // База нормативной технической документации “Complexdoc.ru” : сайт. URL: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/481072/podzemnye_obekty_v_gornyx_vyrabotkakh_kriolitozony_yakutii.pdf (дата обращения: 16.04.2012).
42. *Кузьмин, Г. П.* Подземные сооружения в криолитозоне / Г. П. Кузьмин. Новосибирск : Наука, 2002. 176 с.
43. Рациональное использование естественного холода в регулировании температурного режима подземного холодильника / А. С. Курилко, В. В. Киселев, Ю. А. Хохолов, Е. К. Романова // Наука и образование. 2000. № 4. С. 66–69.
44. *Хохолов, Ю. А.* Выбор оптимальных параметров температурного режима подземных холодильников криолитозоны / Ю. А. Хохолов, Е. К. Романова // ГИАБ. 2004. № 9. С. 290–292.
45. Инженерная геокриология : справочное пособие / Э. Д. Ершов, Л. Н. Хрусталева, Г. И. Дубиков, С. Ю. Пармузин. Москва : Недра, 1991. 439 с.
46. *Павлов, А. В.* Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А. В. Павлов. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 240 с.
47. *Браун, Дж.* Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера / Дж. Браун, Н. А. Граве. Новосибирск : Наука, 1981. 88 с.
48. *Куртнер, Д. А.* Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте / Д. А. Куртнер, А. Ф. Чудновский. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 299 с.

49. *Гаврильев, Р. И.* Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне : справочное пособие / Р. И. Гаврильев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 146 с.
50. *Перльштейн, Г. З.* Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР / Г. З. Перльштейн. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1979. 304 с.
51. Использование естественного холода многолетнемерзлых пород для длительного хранения генетических ресурсов / Б. М. Кершенгольц, Б. И. Иванов, Р. В. Десяткин [и др.] // Вестник ВОГиС. 2008. Т. 12, № 4. С. 524–532.
52. *Емельянова, Т. Я.* Практикум по мерзлотоведению : учебное пособие / Т. Я. Емельянова, В. В. Крамаренко. 2-е изд. Томск : Томский политехн. ун-т, 2012. 116 с.
53. Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера / А. С. Курилко, В. В. Киселев, Ю. А. Хохолов, Е. К. Романова ; Ин-т мерзлотоведения СО РАН. Якутск, 2011. 246 с.
54. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны / А. С. Курилко, А. С. Ермаков, Ю. А. Хохолов [и др.]. Новосибирск : Гео, 2011. 139 с.
55. *Самарский, А. А.* Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. Москва : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
56. *Кудрин, В. Д.* Задача Стефана для вещества, помещенного в контейнер конечной длины / В. Д. Кудрин, О. А. Махоткин // Математические проблемы химии. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1970. С. 57–74.
57. *Будак, Б. М.* Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана / Б. М. Будак, Е. Н. Соловьева, А. Б. Успенский // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5, № 5. С. 828–840.
58. *Самарский, А. А.* Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.
59. *Самарский, А. А.* Теория разностных схем / А. А. Самарский. Москва : Наука, 1983. 616 с.
60. *Галкин, А. Ф.* Тепловой режим подземных сооружений Севера / А. Ф. Галкин. Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 304 с.
61. *Амосов, П. В.* Проверка кода для численного моделирования тепловых процессов в пористой среде с учетом фазового перехода «лед — вода» / П. В. Амосов // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 641–643.
62. *Казаков, А. Н.* Динамика развития теплофизических процессов при подземной изоляции тепловыделяющих РАО в многолетнемерзлых горных породах / А. Н. Казаков, Н. Ф. Лобанов, В. И. Манькин // Геоэкология. 1997. № 2. С. 36–40.
63. Оценка теплового воздействия подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. А. Гусак [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 30–37.
64. Экология подземных объектов ядерной энергетики в условиях криолитозоны / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, Н. В. Новожилова, С. Г. Климин. Ярославль : Принтхаус-Ярославль, 2015. 119 с.
65. Тепловое воздействие подземной атомной станции малой мощности на многолетнемерзлые горные породы / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. А. Гусак [и др.] // Криосфера Земли. 2015. Т. 19, № 2. С. 45–51.

66. The thermal impact of a small underground nuclear plant on permafrost / N. N. Melnikov, P. V. Amosov, S. A. Gusak [et al.] // Earths Cryosphere. 2015. Vol. 19, No. 2. P. 40–45.
67. Амосов, П. В. Влияние пористости многолетнемерзлых горных пород на глубину оттаивания / П. В. Амосов, Н. В. Новожилова // Вестник КНЦ РАН. 2014. № 2 (17). С. 58–64.
68. Иудин, М. М. Геомеханическая модель оценки механических свойств мерзлых горных пород в массиве / М. М. Иудин // Вестник ЯГУ. 2008. Т. 5, № 2. С. 40–45.
69. Мельников, Н. Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России / Н. Н. Мельников // Горный журнал. 2015. № 7. С. 23–27.
70. Мельников, Н. Н. Оценка динамики размера области оттаивания криолитозоны интегрированием теплофизических параметров / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. Г. Климин // Математические методы в технике и технологиях ММТТ. 2016. Т. 1. С. 29–32.
71. Мельников, Н. Н. К вопросу оценки размера области оттаивания криолитозоны посредством интегрирования теплофизических параметров модели / Н. Н. Мельников, П. В. Амосов, С. Г. Климин // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения : материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием / Кольский научный центр РАН. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. С. 294–298.
72. Способ искусственного замораживания грунтов. Текст : электронный. URL: <http://vse-lekcii.ru/mosty-i-tonneli/stroitelstvo-tonnelej-i-metropolitenov/sposob-iskusstvennogo-zamorazhivaniya-gruntov> (дата обращения: 22.01.2015).
73. Амосов, П. В. Влияние пористости породного массива и температуры хладоносителя на скорость создания сплошного ледопородного ограждения / П. В. Амосов, С. В. Лукичев, О. В. Наговицын // Вестник КНЦ РАН. 2016. № 4 (27). С. 43–50.
74. Трупак, Н. Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений / Н. Г. Трупак. Москва : Недра, 1979. 344 с.
75. Белый, В. В. Справочник инженера-шахтостроителя. В 2 томах. Т. 2 / В. В. Белый. Москва : Недра, 1982. 423 с.
76. Бульчев, Н. С. Расчет необходимых параметров ледопородного ограждения в замковой части / Н. С. Бульчев, Д. С. Комаров, С. Б. Лукашин // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2012. Вып. 1, ч. 2. С. 54–60.
77. Николаев, П. В. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода / П. В. Николаев, М. Н. Шуплик // ГИАБ. 2015. № 1. С. 243–251.
78. Математическое моделирование искусственного замораживания грунтов / П. Н. Вабищев, М. В. Васильева, В. Ф. Горнов, Н. В. Павлова // Вычислительные технологии. 2014. № 19 (4). С. 19–31.
79. Маргулова, Т. Х. Атомные электрические станции / Т. Х. Маргулова. Москва : Высш. шк., 1994. 201 с.
80. Крышев, И. И. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России / И. И. Крышев, Е. П. Рязанцев. Москва : ИздАт, 2000. 384 с.
81. Энергетика: история, настоящее и будущее. В 5 томах. Т. 5. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире / В. И. Бондаренко, Г. Б. Варламов, И. А. Вольчин [и др.]. Киев, 2005. Текст : электронный. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-3/3-1> (дата обращения: 04.05.2015).

82. Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций / Л. Н. Антонова, Г. И. Канюк, Т. Е. Погонина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/10 (56). С. 56–62.
83. СТО 1.1.1.02.006.0689-2006 «Водопользование на атомных станциях. Классификация охлаждающих систем водоснабжения». Текст : электронный. URL: http://www.infosait.ru/norma_doc/54/54605/index.htm (дата обращения: 14.04.2015).
84. *Болдырев, В. М.* Значимость «сухих» градирен для АЭС и других тепловых электростанций. Промышленные ведомости, май-июнь 2015 / В. М. Болдырев, П. Г. Клейменов. Текст : электронный. URL: <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2843&nomer=95> (дата обращения: 04.06.2016).
85. Водный кодекс РФ. Статья 60. Охрана водных объектов при проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию, эксплуатации водохозяйственной системы. Текст : электронный. URL: <http://www.zakonrf.info/vodniy-kodeks/60/> (дата обращения: 12.02.2015).
86. Назначение системы технического водоснабжения. Текст : электронный. URL: <http://portal.tpu.ru/SHARED/a/ANTON/education/staes/Tab1/Лекции.pdf> (дата обращения: 19.04.2015).
87. *Лаптев, А. Г.* Устройство и расчет промышленных градирен / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. Казань : Изд-во КГЭУ, 2004. 180 с.
88. Основные типы охлаждательных устройств оборотных систем водоснабжения. Текст : электронный. URL: <http://nuclearfactor.ru/energy/aes/53-177.html> (дата обращения: 17.06.2015).
89. Типы и принцип работы охладителей оборотных систем технического водоснабжения - Атомные электрические станции и их оборудование. Текст : электронный. URL: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/atomnye-elektricheskie-stancii-i-ih-oborudovanie-16.html> (дата обращения: 17.06.2015).
90. *Полтораков, Г. И.* Дилемма: градирни «мокрые» или «сухие» / Г. И. Полтораков. Текст : электронный. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3823> (дата обращения: 4.05.2015).
91. *Никиенко, Ю. В.* Моделирование и оценка влияния тепловых выбросов ТЭС и АЭС в атмосферу на микроклимат районов их размещения / Ю. В. Никиенко. Текст : электронный. URL: <http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-i-otsenka-vliyaniya-teplovyykh-vybrossov-tes-i-aes-v-atmosferu-na-mikroklimat-ra> (дата обращения: 04.07.2015).
92. *Косач, Н. И.* Анализ эффективности охлаждательных устройств в оборотных системах водоснабжения АЭС / Н. И. Косач, Н. В. Бейнер. Текст : электронный. URL: http://metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2014/pages/04/7.pdf (дата обращения: 24.05.2015).
93. РД 153-34.2-21.144-2002. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Санкт-Петербург, 2004. 57 с.
94. Теплообменники энергетических установок. Текст : электронный. URL: <https://openedu.urfu.ru/files/book/index.html> (дата обращения: 22.06.2015).

95. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. Текст : электронный. URL: http://www.eifs.ru/download/snip_23-01-99_klimat.pdf (дата обращения: 25.11.2013).
96. Ожидаемые радиационные и радиоэкологические последствия эксплуатации плавучих атомных электростанций / А. А. Саркисов, В. Л. Высоцкий, В. П. Билашенко [и др.] // Атомная энергия. 2008. Т. 104, вып. 3. С. 179–187.
97. *Бахметьев, А. М.* Расчетно-экспериментальное обоснование безопасности РУ КЛТ-40С для плавучей АСММ : презентация доклада / А. М. Бахметьев, М. А. Большухин, А. Н. Лепехин // Межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция (Москва, 11–12 ноября 2010 г.). Москва : ИБРАЭ, 2010. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Систем. требования: 1 Гб ОЗУ; 4хCD-ROM дисковод; 32-бит. CD:\Session4\4.6pdf. 28р. Текст : электронный.
98. НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. САНПиН 2.6.1.2523-09 / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Москва, 2009. 100 с.
99. ОСПОРБ 99/2010. СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. Текст : электронный. URL: <http://www.nucloweb.jinr.ru/nucloserv/inform/osprb-99-2010.pdf> (дата обращения: 15.04.2013.).
100. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций. САНПиН 2.6.1.24-2003 (СП АС-03). Текст : электронный. URL: http://www.niiot.ru/doc/lib/СанПиН_2.6.1.24-03.doc (дата обращения: 15.04.2013).
101. MACCS. MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS): Model description. (NUREG/CR-4691; SAND86-1562). Vol. 2 / USA: Sandia National Laboratory. 1990. 307 p.
102. *Козлов, В. Ф.* Справочник по радиационной безопасности / В. Ф. Козлов. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
103. Защита от ионизирующих излучений : 2 томах. Т. 2. Защита от излучений ядерно-технических установок / Н. Г. Гусев, Е. Е. Ковалев, В. П. Машкович, А. А. Суворов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
104. *Машкович, В. П.* Защита от ионизирующих излучений : справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. Москва : Энергоатомиздат, 1995. 496 с.

Глава 4

ВЛИЯНИЕ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА НА КОНСТРУКТИВНЫЕ И ОБЪЕМНО-КОМПОНОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ АСММ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

В основу государственной политики РФ в области обращения с ОЯТ положен принцип переработки облученного топлива для обеспечения экологически приемлемого обращения с продуктами деления и возврата в ядерный топливный цикл регенерированных ядерных материалов. В особых случаях, связанных с большой удаленностью атомной станции, с отсутствием адекватной транспортно-технологической инфраструктуры или технологии переработки отдельных видов ОЯТ, рассматривается вариант длительного промежуточного хранения топлива с отсрочкой на будущее принятия решения об окончании топливного цикла.

Учитывая удаленность потенциальных площадок размещения АСММ, рассматриваемых в качестве источников энергоснабжения в труднодоступных районах российской Арктики, мы можем полагать, что одним из возможных вариантов обращения с ОЯТ из реакторов АСММ является сухое хранение топлива на площадке станции в течение всего срока ее эксплуатации. Таким образом, в разработках концептуальных представлений о подземных комплексах АСММ различного типа, а также при обосновании конструктивных и объемно-компоновочных решений следует учитывать различные аспекты безопасности функционирования как реакторных установок, так и хранилищ ОЯТ для АСММ различного типа.

Основным фактором, определяющим безопасность эксплуатации хранилища ОЯТ, является изотопный состав и накопленная радиоактивность облученного топлива, которые зависят от энергоресурса активных зон реакторов, числа перегрузок и типа применяемого ядерного топлива. Для определения радиоактивности ОЯТ выполнялись работы по математическому моделированию топливных циклов реакторов АСММ. При этом были учтены принятые в проектах реакторов современных АСММ новации, направленные на улучшение технико-экономических показателей и повышение безопасности. К ним, в частности, относятся:

- повышение энергоресурса активных зон реакторов и соответственно повышение продолжительности непрерывной работы на мощности, снижение числа перегрузок ядерного топлива в течение жизненного цикла станции;
- снижение обогащения урана изотопом ^{235}U до 20 % или менее в соответствии с соглашением о нераспространении ядерных материалов.

Определение изотопного состава и радиоактивности ОЯТ позволило рассматривать вопросы ядерной, радиационной и тепловой безопасности, которые проявятся при изучении концептуальных представлений о конструкциях и компоновках хранилищ различного типа. К ним следует отнести:

- выбор типа размещения отработавших тепловыделяющих сборок в хранилищах;
- определение остаточных тепловыделений и обоснование системы отвода тепла от хранилищ ОЯТ;

- снижение интенсивности нейтронного и гамма-излучений, а также обоснование выбора материалов и толщины экранов биологической защиты хранилищ ОЯТ.

Таким образом, в рамках аналитических и расчетно-теоретических исследований решались следующие основные научные задачи:

- определение радиоактивности отработавшего ядерного топлива реакторов подземных АСММ;
- обоснование типов хранения ОЯТ и разработка концептуальных представлений о хранении ядерных материалов в подземных комплексах АСММ;
- оценка радиационной, ядерной и тепловой безопасности хранилищ ОЯТ подземных АСММ;
- разработка рекомендаций по оптимизации конструктивных и объемно-компоновочных решений подземных комплексов АСММ.

Выполненные исследования имеют комплексный характер. Ключевой являлась задача по изучению топливных циклов реакторов АСММ («УниTERM», АБВ, КЛТ-40С, РИТМ-200, СВБР-10, СВБР-100) и определение массовых изотопных составов и радиоактивности ОЯТ этих реакторов. Полученные при математическом моделировании топливных циклов активных зон реакторов АСММ результаты позволяют определить исходные данные для решения задач ядерной, радиационной и тепловой безопасности хранилища ОЯТ подземных АСММ. Для решения задачи ядерной безопасности основными исходными данными являются количество делящихся изотопов в ОЯТ активной зоне реактора, для решения задачи радиационной безопасности — радиоактивность γ -излучающих и спонтанно делящихся радионуклидов, для решения тепловой задачи — радиоактивность или тепло распада всех радионуклидов, содержащихся в ОЯТ активной зоны реактора в зависимости от времени хранения. Решение задач ядерной, радиационной и тепловой безопасности, а также учет нормативных требований по безопасности дает возможность определить ограничения на количество ТВС в упаковках (контейнерах) и оценить число упаковок, необходимых для размещения ОЯТ одной активной зоны.

Полное число упаковок ОЯТ в хранилище оценивается с учетом проектных характеристик по показателям ресурса активных зон и атомной станции, что позволяет разработать рекомендации по конструктивным и объемно-планировочным решениям подземных комплексов АСММ.

4.1. Оценка радиоактивности ОЯТ реакторов АСММ

При изучении вопроса об уровне радиоактивности ОЯТ активных зон реакторов АСММ авторы не ставили задачу определения полного радионуклидного состава образующихся продуктов деления. Как известно, смесь продуктов деления ядра ^{235}U содержит более 600 радиационно значимых радионуклидов с периодами полураспада от секунд до миллионов лет [1], поэтому определение данных о радиационных характеристиках полного радионуклидного состава ОЯТ является целью получения справочных значений.

Авторы преследовали ограниченную цель — оценить количество (массы) и радиоактивность долгоживущих продуктов деления и актиноидов с периодами полураспада в основном более 10 лет, что объясняется продолжительным (более 10 лет) хранением ОЯТ реакторных установок АСММ в приреакторных

хранилищах, когда короткоживущие радионуклиды распадаются. В исследованиях и анализах результатов рассматривались β -активные ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10,9$ года), ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,6$ года), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,1$ года), ^{151}Sm ($T_{1/2} = 90$ лет) и α -активные ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{236}U , ^{237}Np , ^{241}Am ($T_{1/2} = 433$ года), ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18,1$ года). Именно этот набор радионуклидов в основном определяет величину радиоактивности ОЯТ на стадии обращения с облученным топливом при транспортировке, хранении в приреакторных хранилищах и радиохимической переработке. В этот набор, естественно, следует включать изотопы стартовой загрузки урана (^{235}U и ^{238}U), при выгорании которых в активной зоне реактора и образуются продукты деления и новые актиноиды.

Оценка радиоактивности ОЯТ предполагает изучение изотопного состава активной зоны в процессе эксплуатации реакторов АСММ от начала кампании до окончания топливного цикла. Примененная методика расчета изотопного состава АЗ основывается на разработке математических моделей нейтронно-физических процессов в ядерном реакторе, который эксплуатируется на протяжении топливного цикла в состоянии критичности, то есть моделей топливного цикла. Для описания нейтронно-физических процессов, а также кинетики выгорания стартовых изотопов топливной загрузки (^{235}U и ^{238}U) и образования продуктов деления и актиноидов применен реакторный программный комплекс «КРАТЕР» [2]. Разработка математических моделей топливных циклов предполагает определение материального состава и геометрии АЗ и отражателей нейтронов, а также энергетических параметров (мощность и энерговыработка) изучаемых реакторов, что требует изучения проектных материалов реакторных установок АСММ.

4.1.1. Реакторные установки малой мощности

Уже к началу 1990-х гг. в нашей стране насчитывалось более сорока в различной степени проработанных отечественных проектов реакторных установок малой мощности. Как отмечалось ранее, в настоящее время в ряде научно-исследовательских институтов (НИКИЭТ, ФЭИ) и конструкторских бюро (ОКБ «Африкантов», ОКБ «Гидропресс») на основе опыта атомного судостроения разработаны и находятся в разной стадии готовности к практической реализации несколько вариантов установок различных типов и компоновок, которые могут быть использованы для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей в арктических регионах РФ [3–5].

В настоящей работе для изучения особенностей топливных циклов реакторов АСММ рассмотрены реакторные установки, которые, по мнению авторов, по совокупности факторов (наличие прототипа, готовность к практической реализации, продолжительность топливного цикла, возможность эксплуатации в режиме когенерации (комбинированное производство электрической и тепловой энергии), степень автономности и др.) относятся к наиболее приоритетным типам установок: РИТМ-200М, КЛТ-40С, АБВ, «УниTERM», СВБР-100, СВБР-10. Следует отметить, что указанное мнение авторов формировалось с учетом полноты данных о РУ, имеющихся на время выполнения данной работы.

Проекты перечисленных РУ были разделены на два класса по типу технологии теплоносителя первого контура. Первый включает проекты, основанные на применении корпусных водо-водяных реакторов на тепловых

нейтронах с водой под давлением в качестве теплоносителя. Ко второму классу относятся установки с реакторами на быстрых нейтронах типа СВБР-100 и СВБР-10, охлаждаемыми расплавом эвтектики Pb-Bi, часто называемым свинцово-висмутовым теплоносителем.

В качестве прототипных установок для класса водо-водяных реакторов рассматриваются две: корабельная РУ типа ОК-900А атомного ледокола (а/л) «Сибирь», которая эксплуатировалась с 1978 по 1992 гг. и выработала 84 ГВт·сут тепловой энергии в первой арктической навигации (1978–1980 гг.), и установка типа КЛТ-40, которой был оснащен атомный лихтеровоз «Севморпуть». Две активные зоны реактора КЛТ-40 были отработаны в период с 1988 по 1999 гг. со средней энерговыработкой 78 ГВт·сут [6].

Прототипной для класса жидкометаллических реакторов можно считать РУ атомных подводных лодок проекта 705К с проектным энергоресурсом ~ 25 ГВт·сут, которые эксплуатировались в период с 1970 по 1996 гг. [7].

Для получения исходных данных для математических моделей топливных циклов РУ обоих классов были изучены опубликованные в различных изданиях материалы проектов организаций и ОКБ — разработчиков установок. Для водо-водяных реакторов типа АБВ и «УниTERM» были использованы проектные данные ОКБМ «Африкантов» и института НИКИЭТ, приведенные в отчете МАГАТЭ TECDOC-1536 [8], для реакторов КЛТ-40С — в материалах международной конференции «Малая энергетика — 2005» [9] и технической справке Курчатовского института [10]. Информация о жидкометаллических реакторах на быстрых нейтронах СВБР-100 и СВБР-10 была получена из публикаций специалистов ОКБ «Гидропресс» в журнале «Вопросы атомной науки и техники» [11] и на международной конференции «Атомэкспо-2009» [12].

Все прототипные реакторы и их математические модели представлены в докладе авторов на IV международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», состоявшейся в 2013 г. в Томске [13].

Объем необходимой для выполнения исследований информации и типы параметров, используемых в качестве исходных данных, определяются особенностями выбранной методологии.

4.1.2. Методика исследований

Изучение образования радиоактивных ядер в ядерном реакторе предполагает математическое моделирование топливного цикла его активной зоны. Для топливного цикла рассчитывается выгорание изотопов начальной загрузки (^{235}U , ^{238}U) и образование из них ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm и других актиноидов, а также радиоактивных продуктов деления, главными дозообразующими из которых являются радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs и продукты их распада ^{90}Y и $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Эти процессы происходят при эксплуатационной мощности и прекращаются при исчерпании энергоресурса АЗ.

Нами были разработаны упрощенные математические модели активных зон рассматриваемых реакторов с описанием нейтронно-физических процессов с помощью программного комплекса «КРАТЕР». ПК «КРАТЕР» имеет алгоритм численного решения уравнений баланса нейтронов в реакторе в многогрупповом диффузионном приближении и уравнений кинетики выгорания изотопов ^{235}U и ^{238}U и накопления актиноидов, а также стабильных и долгоживущих продуктов

реакций деления. Эти уравнения решаются совместно для последовательности временных шагов выгорания топлива, на которые разбивается топливная кампания реактора.

Таким образом осуществляется моделирование топливного цикла ядерного реактора и определяется массовый состав радионуклидов в ОЯТ. Комплекс «КРАТЕР» требует задания эксплуатационной мощности, времени работы реактора, а также геометрии и материального состава активной зоны и отражателей. Периодическая структура активной зоны, состоящей из определенного количества одинаковых тепловыделяющих элементов или тепловыделяющих сборок, учитывается с помощью модели элементарной гетерогенной ячейки.

Параметры топливных циклов и характеристики активных зон изучаемых реакторов как исходные данные для построения математических моделей представлены в табл. 4.1 и 4.2.

4.1.3. Радиоактивность ОЯТ водо-водяных реакторов АСММ и реакторов-прототипов с водой под давлением

Гетерогенная АЗ канального типа РУ ОК-900А имеет в своем составе 241 технологический канал, каждый из которых представляет собой трубу $\varnothing 60 \times 1$ мм из цирконий-ниобиевого сплава, внутри которой размещается пучок из 61 стержневого элемента (54 твэла и 7 поглощающих элементов).

Твэлы расположены регулярно с шагом 7 мм. В 16 ТК их центральные части использованы для размещения поглощающих стержней системы управления и защиты реактора, перемещающихся в стальной трубке диаметром примерно 25 мм. Стержневые твэлы диаметром 5,8 мм имеют оболочку толщиной 0,5 мм из нержавеющей стали. Поперечное сечение ТК и твэл показаны на рис. 4.1.

Теплоноситель — вода под давлением приблизительно 13 МПа и средней температурой 298 °С — проходит по межтвэльному пространству ТК. Технологические каналы располагаются по периодической треугольной решетке с шагом 72 мм, образуя активную зону по форме, близкой к цилиндрической. Между каналами проходит вода с более низкой, чем у теплоносителя, температурой (~285 °С), которая является, как и теплоноситель, замедлителем нейтронов.

В качестве топливной композиции рассматривается интерметаллид UAl_3 , распределенный в алюминиевой матрице. Топливная композиция заполняет внутреннее пространство твэльной трубки и образует топливный сердечник твэла. Высота топливного сердечника, определяющая высоту активной зоны, составляет 1 м. Эквивалентный диаметр активной зоны при шаге ТК 72 мм равен 1,155 м. Активная зона окружена несколькими цилиндрическими обечайками из стали 1X18Н10Т, между которыми протекает охлаждающая их вода. Слои стали и воды с общей толщиной приблизительно 30 см выполняют функцию радиационной защиты корпуса реактора и являются отражателями нейтронов.

Топливный цикл активной зоны реакторной установки ОК-900А атомного ледокола «Сибирь», которая может рассматриваться в качестве прототипа для РУ «УниTERM» (см. табл. 4.2), характеризуется средней эксплуатационной мощностью 100 МВт, продолжительностью цикла 2,3 года и энерговыработкой 84 ГВт·сут, а также топливной загрузкой 513 кг урана при среднем значении обогащения 40,6 %.

Параметры топливных циклов реакторных установок АСММ и их прототипов [6–13]

РУ АСММ/ корабля	Тепловая мощность, МВт	Энерговыработка, ГВт·сут	Кампания АЗ, годы	Продолжительность топливного цикла, годы	Время между перегрузками, годы	Температура теплоносителя вход/выход, °С	Давление теплоносителя, МПа	Срок службы **, годы
АБВ	45	131,5	8,0	9,4	10–12	247/330	15,7	40–50
«УниTERM»	30	181	16,5	20,6	25	249/330	16,5	60
КЛТ-40С	150	137,5	2,51	3,9	4	280/317	12,7	40
РИТМ-200М	175	291,7	4,57	7,03	10–12	277/313	15,7	40
КЛТ-40 атомного лихтеровоза «Севморпуть»	135	78	1,58	~5,5	~6	279/311	13	15–20
ОК-900А а/л «Сибирь»	171	84	1,35	2,3*	4	273/316	13	15–20
СВБР-100	280	631	6,18	7,7	8	345/495	6,7	60
СВБР-10	43,3	243	15,4	18-19	20–21	320/480	?	40
АПЛ проекта 705К	150	25	0,46	~5,0	–	235/440***	?	40

* Реактор № 2 в кампании 1978–1980 гг.

** Проектные показатели.

*** Стенд 27/ВТ.

Характеристики реакторов АСММ и их прототипов [5–8, 10–15]

РУ АСММ/ корабля	Загрузка урана, т	Среднее обогащение урана изотопом ^{235}U , %	Тип АЗ	Число ТВС	Шаг решетки ТВС, см	Диаметр ТВЭЛ, мм	Материал оболочки ТВЭЛ	Топливная композиция	Число ТВЭЛ в АЗ	Диаметр/ высота АЗ, м	Среднее выгорание топлива, г/см ³
АБВ	1,4	16,5	Кассетная	121	10	6,8×0,5	Сплав Э-110	UO ₂ в силуминовой матрице	9317	1,155/1,3	0,43
«Унитерм»	1,58	19,7	Канальная	265	7,2	5,8×0,5	Сплав Э-110	UO ₂ в циркониевой матрице	14310	1,155/1,1	0,665
КЛТ-40С	1,53	17,4	Кассетная	121	10	6,2×0,5	Сплав Э-635	UO ₂ в силуминовой матрице	12342	1,155/1,3	0,429
РИТМ-200М	3,2	17,5	Кассетная	199	10	6,2×0,5	Сталь	То же	20467	1,48/1,65	0,429
КЛТ-40 атомного лихтеровоза «Севморпуть»	0,167	90	Канальная	241	7,2	5,8×0,5	Сплав Э-110	уран- циркониевый сплав	12787	1,155/1,0	0,35
ОК-900А а/л «Сибирь»	0,51	40,6	Канальная	241	7,2	5,8×0,5	Сталь	UAl ₃ в алюминиевой матрице	12787	1,155/1,0	0,38
СВБР-100	9,188	16,5	Кассетная	61	20	12×0,4	Сталь	UO ₂	12078	1,646/0,9	0,62
СВБР-10	4,037	18,7	Кассетная	27	20	12×0,4	Сталь	UO ₂	5258	1,086/0,9	0,62
АПЛ проекта 705К	0,182	89	Кассетная	*	*	11×0,5	Сталь	UBe ₁₃ в бериллиевой матрице	4200	0,885/0,928	< 0,1

* В настоящей работе не использовались.

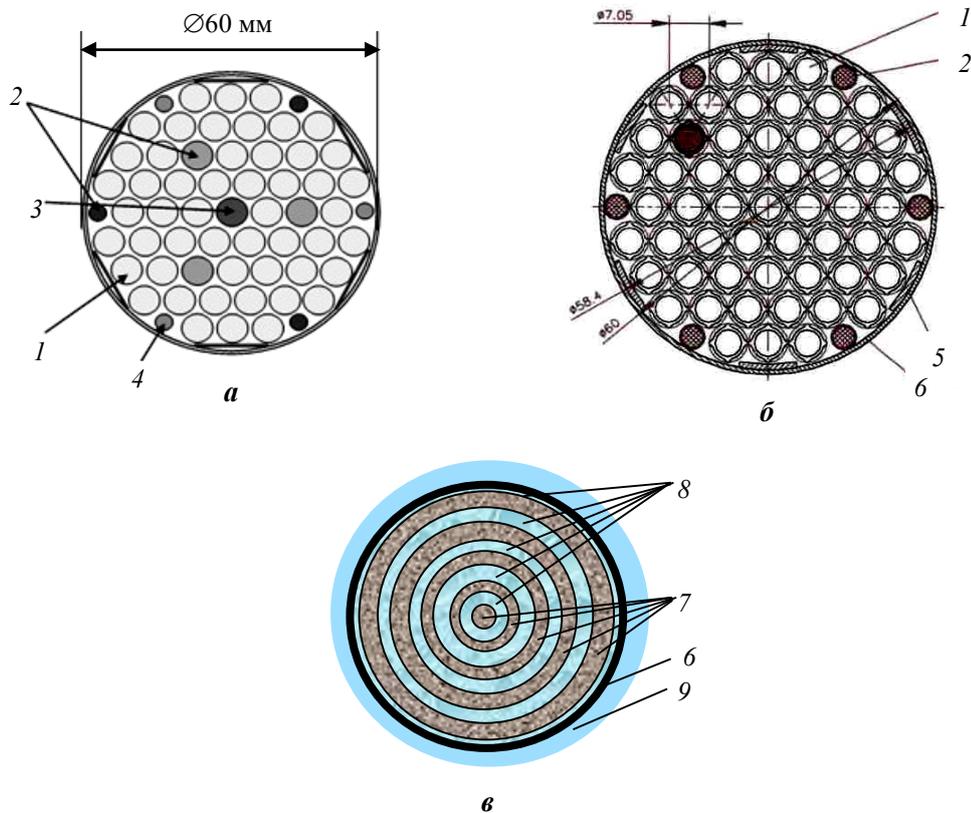


Рис. 4.1. Поперечное сечение ТК активных зон водо-водяных реакторов:
a — канал ледокольной активной зоны 10-14-3М РУ ОК-900А [15];
б — ТК активной зоны реактора «УниTERM» [8]; *в* — модель топливного кластера ТК транспортных реакторов; 1 — твэл; 2 — стержень выгорающего поглотителя; 3 — РИИ; 4 — стойки дистанционирующей решетки; 5 — плитообразный вытеснитель; 6 — кожух; 7 — топливные слои; 8 — теплоноситель; 9 — межканальная вода

На основе представленных данных была разработана математическая модель топливного цикла РУ ОК-900А в одномерной цилиндрической геометрии реактора и реакторной ячейки.

Выбор цилиндрической одномерной объясняется тем, что в корпусных реакторах с водой под давлением внутрикорпусные конструкции, активные зоны, а также технологические каналы и твэлы имеют цилиндрическую форму.

Для учета радиальной зависимости ППН и профилирования энерговыделения активная зона разбивается на 8 равновеликих по объему подзон. В четырех центральных подзонах обогащение урана принято равным 36 %, в четырех периферийных — 45 %. Радиальная неравномерность распределения ППН в ТК учитывается с помощью модели многозонной кольцевой ячейки, в которую преобразуется технологический канал с окружающей его водой (см. рис. 4.1).

Оцененный для этого реактора эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$ для состава без выгорающего поглотителя в горячем отравленном ^{135}Xe и ^{149}Sm состоянии АЗ на мощности 100 МВт оказался равным приблизительно 1,31, что соответствует большой по величине избыточной реактивности — более 23 %. Таким образом, при разработке модели топливного цикла реактора следует предварительно решать вспомогательную, но важную задачу — определение массы ВП и его распределения по АЗ с учетом влияния на пространственное распределение энерговыделения. Эта задача решалась расчетами по ПК «КРАТЕР» размножающих свойств АЗ при распределении части ВП в трубах ТК (гомогенный ^{10}B) и в центральном твэле ТК (гетерогенный поглотитель Gd или ^{10}B). После определения массы и распределения ВП по подзонам АЗ были выполнены расчеты изотопного состава в конце топливного цикла. Результаты этих расчетов приведены в табл. 4.3.

Наиболее близким к изученному прототипу по конструкции АЗ является реактор АСММ «УниTERM». Он имеет одинаковые с реактором ОК-900А по конструкции ТК (см. рис. 4.1), но их число и высота топливного сердечника увеличены до 265 штук и 110 см соответственно.

Другой мерой, направленной на увеличение топливной загрузки, является применение вместо интерметаллида $\text{UAl}_3 + \text{Al}$ металлокерамической топливной композиции. Она представляет собой дисперсию частиц двуокиси урана, покрытых тонким слоем циркония в циркониевой матрице. Объемная доля частиц UO_2 в топливном сердечнике составляет ~60 %, а ураносодержание повышено с 2,2 до ~5,6 г/см³. В результате при принятом обогащении урана изотопом ^{235}U 19,7 % загрузка ^{235}U в АЗ реактора «УниTERM» составляет 312 кг при массе урана 1580 кг. Увеличение загрузки ^{235}U с 208 (в АЗ прототипа) до 312 кг позволило увеличить энерговыработку с 84 до 181 ГВт·сут. В математической модели топливного цикла реактора «УниTERM» используются параметры: эксплуатационная мощность — 24 МВт, продолжительность цикла — 20,6 года.

Результаты расчетов массового состава долгоживущих актиноидов и продуктов деления, выполненных по ПК «КРАТЕР» с приведенными показателями, представлены в табл. 4.3.

Следующую большую группу изучаемых РУ со сходными конструктивно-технологическими решениями по АЗ образуют АБВ, КЛТ-40С и РИТМ-200М. Топливный цикл этих РУ отличается от прототипных большими значениями энергоресурса и продолжительности топливного цикла (см. табл. 4.1). Обеспечение высоких энергоресурсов требует увеличения топливных загрузок, что достигается в проектах РУ АСММ увеличением объемов топлива и его ураноемкости по сравнению с прототипами.

В рассматриваемых РУ активные зоны имеют кассетную компоновку и формируются из гексагональных тепловыделяющих сборок (кассет), располагающихся в узлах правильной треугольной решетки с шагом 100 мм (см. рис. 4.2). Число ТВС для АЗ реакторов АБВ и КЛТ-40С принято равным 121, а высота АЗ увеличена до 1,3 м. Для установки РИТМ-200М большой по величине энергоресурс обеспечивается увеличением числа ТВС до 199 и высоты — до 1,65 м.

Переход на АЗ кассетного типа позволил увеличить число и диаметр твэл в ТВС:

- в РУ АБВ с 54 (как в КЛТ-40) до 77 при диаметре 6,8×0,5 мм;
- в РУ КЛТ-40С до 102 при диаметре 6,2×0,5 мм.

Таблица 4.3

Сравнение масс и активностей долгоживущих радионуклидов в конце топливного цикла водо-водяных реакторов АСММ и их прототипов (программа «КРАТЕР»)

Параметр	Реакторные установки					
	КЛТ-40 атомного лихтеровоза «Севморпуть»	ОК-900А а/л «Сибирь»	«Униатерм»	АБВ	КЛТ-40С	РИТМ-200М
Масса, кг						
²³⁵ U	51,7	100	108	88	119	243
²³⁷ Np	1,01	1,12	3,34	2,02	2,47	5,38
²³⁸ Pu	0,345	0,21	0,82	0,526	0,606	1,32
²³⁸ U	14,9	296	1220	1128	1224	2544
²³⁹ Pu	0,41	4,21	12,4	9,77	13,3	28,7
²⁴⁰ Pu	0,16	1,11	4,39	3,49	3,79	8,24
²⁴¹ Pu	0,13	0,92	3,40	2,57	3,22	7,15
²⁴¹ Am	0,004	0,043	0,87	0,31	0,156	0,636
²⁴⁴ Cm	0,001	0,01	0,036	0,025	0,027	0,0575
⁸⁵ Kr	0,074	0,079	0,098	0,093	0,116	0,221
⁹⁰ Sr	1,68	1,825	3,03	2,40	2,68	5,45
¹³⁷ Cs	2,78	3,12	5,66	4,42	4,91	10,1
¹⁵¹ Sm	0,01	0,026	0,036	0,028	0,041	0,087
Полная α-активность, ПБк	0,222	0,19	0,817	0,50	0,548	1,225
Удельная α-активность, ТБк/кг	0,026	0,20	0,324	0,263	0,265	0,286
Полная β-активность*, ПБк	35,7	39,4	68	53,6	60	122
Удельная β-активность, ТБк/кг	42,5	41,6	27	28,3	28,9	28,5

* Без учета ²⁴¹Pu.

Материал оболочки — цирконий-ниобиевый сплав Э-110. В сердечниках твэл применена топливная композиция дисперсионного типа — крупка двуокиси урана в силициновой матрице с содержанием урана в матрице примерно $4,5 \text{ г/см}^3$. Гетерогенная структура кассетных активных зон (см. рис. 4.2) в математических моделях топливных циклов учитывается с помощью пятизонной элементарной реакторной цилиндрической ячейки, состоящей из зон ВП, топлива, оболочки твэл, теплоносителя и конструкционных материалов (чехол ТВС, матрица стержней ВП, РИН). Профилирование энерговыделения осуществляется разделением АЗ на две подзоны, для которых задаются ячейки с различающимся обогащением урана. Кроме того, каждая подзона разделяется на 4 слоя с различным содержанием ВП. Материальные составы зон реакторных ячеек задаются атомными концентрациями элементов, определяемых по данным характеристик АЗ (см. табл. 4.2).

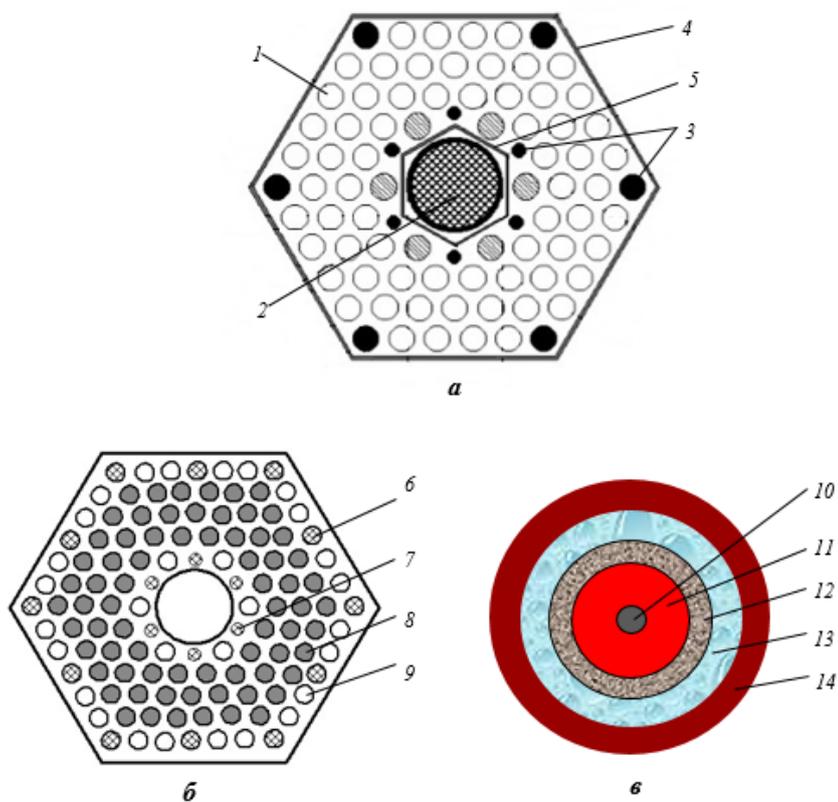


Рис. 4.2. Поперечное сечение ТВС активных зон кассетного типа реакторов АСММ:

- а, б* — кассеты реакторов АБВ-6 [8] и КЛПТ-40С [10] соответственно;
в — модель реакторной цилиндрической ячейки; *1* — твэл; *2* — ПЭЛ;
3 — стержень выгорающего поглотителя; *4* — внутренняя труба; *5* — внешняя труба; *6* — СВП или РИН с внешним диаметром 6,2 мм; *7* — СВП или РИН с внешним диаметром 4,6 мм; *8* — «тяжелый» твэл; *9* — «легкий» твэл;
10 — ВП; *11* — топливо; *12* — оболочка твэл; *13* — теплоноситель (вода);
14 — конструкционные материалы

Результаты исследований массового состава долгоживущих радионуклидов и их активностей в конце топливного цикла реакторов АБВ, КЛТ-40С и РИТМ-200М также приведены в табл. 4.3.

4.1.4. Радиоактивность ОЯТ реакторов типа СВБР

В России разработано два проекта реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем СВБР-10 и СВБР-100, отличающихся высокой автономностью, которые предполагается применять в качестве энергоисточников в отдаленных районах России. Реактор СВБР-100 рассматривается для применения в составе региональных электростанций. Технические характеристики этого реактора изучены достаточно подробно (см. табл. 4.2), и они могут использоваться в нашем исследовании. Известна публикация [11], в которой топливный цикл АЗ реактора СВБР изучен с применением строгих методов расчета и определен изотопный состав актиноидов в конце кампании (см. табл. 4.4). Однако в работе [11] не исследовался изотопный состав продуктов деления, что не допускает сопоставления этого реактора с другими типами. Поэтому необходимость разработки математической модели топливного цикла и изучения активности ОЯТ реактора СВБР сохранилась.

Активную зону реактора СВБР-100 образуют 61 ТВС кассетного типа, расположенных в узлах правильной треугольной решетки с шагом 20 см, определяя диаметр активной зоны (164,6 см). В центре каждой ТВС имеется шестигранная кессонная труба с размером под ключ 31 мм, в пространство вокруг которой занимает пучок из 198 твэл, расположенных по треугольной решетке с шагом 13,6 мм. Кессонные трубы предназначены для размещения в них поглощающих стержней СУЗ. Материал стержней — карбид бора. Всего имеется 54 стержня. Ядерное топливо в форме таблеток из диоксида урана плотностью 10,6 г/см³ размещается в отдельных трубках диаметром 12 мм, образующих твэл. Высота столба таблеток, равная 90 см, является высотой АЗ. Структура АЗ и ее радиального отражателя показана на картограмме (рис. 4.3). Радиальный отражатель представляется стальной конструкцией, вмещающей Рb-Bi-теплоноситель толщиной 25 см.

Геометрия реактора представляется одномерной цилиндрической моделью. Математическая модель топливного цикла на основе ПК «КРАТЕР» разработана на базе представленной информации и данных табл. 4.2. Эксплуатационная мощность принята равной номинальной тепловой мощности, а продолжительность топливного цикла — кампании реактора 6,2 года. В АЗ применяется пятизонное радиальное профилирование энерговыделения переменным обогащением, возрастающим от центра к периферии. Среднее обогащение урана изотопом ²³⁵U равно 16,5 %. С целью корректировки учета утечки нейтронов из АЗ учитывается гетерогенность размещения материалов в ТВС. Учет утечки осуществляется с помощью модели элементарной цилиндрической реакторной ячейки, в которой выделяется зона кессонной трубы.

Для расчета изотопного состава АЗ реактора СВБР-10 также рассмотрен режим номинальной тепловой мощности с энерговыработкой 271 ГВт·сут и кампанией 15,4 года. Активная зона компонуется такими же ТВС, как в реакторе СВБР-100, число ТВС равно 27.

Таблица 4.4

Сравнение масс и активностей долгоживущих радионуклидов
в конце топливного цикла жидкометаллических реакторов АСММ
и их прототипа — реактора АПЛ проекта 705К

Параметр	Реактор на промежуточных нейтронах АПЛ проекта 705К (ПК «КРАТЕР»)	Реакторы АСММ на быстрых нейтронах	
		СВБР-10 (ПК «КРАТЕР»)	СВБР-100 (ПК «КРАТЕР» и [11])
Масса, кг			
^{235}U	126,4	504	941
^{237}Np	0,87	3,0	6,77
^{238}Pu	0,082	0,31	0,814
^{238}U	16,48	3113	7220
^{239}Pu	1,33	111	331
^{240}Pu	0,086	4,75	16,4
^{241}Pu	0,062	0,175	0,53
^{241}Am	0,001	0,013	0,0368
^{244}Cm	0,000003	0,00001	0,000022
^{85}Kr	0,0252	0,143	0,472
^{90}Sr	0,559	4,11	11,98
^{137}Cs	0,917	7,61	21,83
^{151}Sm	0,042	0,685	1,71
α -активность			
полная, ПБк	0,056	0,597	1,49
удельная, ТБк/кг	0,142	0,148	0,162
β -активность			
полная, ПБк	11,9	92,1	263
удельная, ТБк/кг	30,1	22,8	28,6

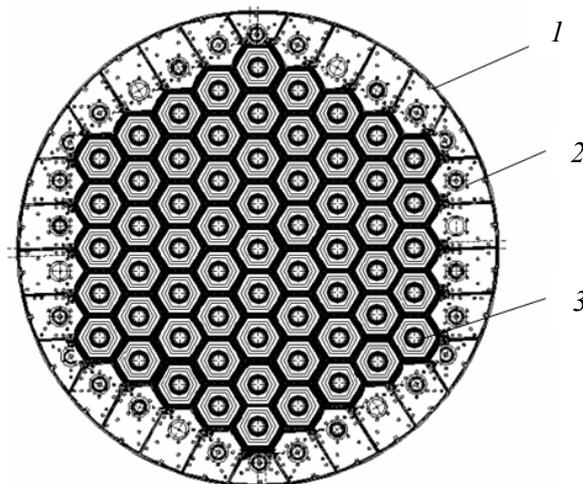


Рис. 4.3. Картограмма активной зоны и отражателя реактора СВБР-100 [16]:
1 — корпус выемного блока; 2 — элемент бокового отражателя; 3 — ТВС

Результаты расчетов изотопного состава активной зоны реактора СВБР-10, а также массы долгоживущих продуктов деления реактора СВБР-100 показаны в табл. 4.4. Массовый состав актиноидов в данном реакторе принят согласно данным работы [11].

4.1.5. Обсуждение результатов

Данные по массовому изотопному составу и активности долгоживущих радионуклидов и актиноидов (табл. 4.3 и 4.4) являются достаточно полной радиационной характеристикой ОЯТ изученных реакторов АСММ и их прототипов. Они позволяют сопоставить радиационные характеристики облученного топлива на момент окончания топливного цикла активных зон реакторов различных типов и технологий: водо-водяных реакторов с водой под давлением и жидкометаллических реакторов.

Необходимо прокомментировать три темы: о делящихся материалах, о радиоактивности ОЯТ, о сравнительных характеристиках прототипных активных зон и реакторов АСММ.

Из данных табл. 4.3 и 4.4 следует, что масса ^{235}U в топливных загрузках водо-водяных реакторов снижается за счет выгорания в 2–3 раза, оставаясь достаточно высокой в конце кампании — около 100 кг в активных зонах реакторов АБВ, «УниTERM», КЛТ-40С и 243 кг в реакторе АСММ РИТМ-200М. При этом обогащение урана в конце топливного цикла также остается высоким — от 7,1 (АБВ) до 8,5 % (РИТМ-200М). Следует отметить относительно высокое выгорание ^{238}U (около 2 %) и, соответственно, высокое накопление делящихся изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu : 12,3 кг в АБВ, 15,8 кг в «УниTERM», 16,5 кг в КЛТ-40С и 35,9 кг в РИТМ-200М, что объясняется продолжительным топливным циклом и высоким содержанием ^{238}U в топливной загрузке.

Столь высокое содержание делящихся изотопов в облученном топливе в конце топливного цикла позволяет сделать вывод о целесообразности радиохимической переработки ОЯТ реакторных установок АСММ с целью извлечения ^{235}U и ^{239}Pu . В качестве примера по сопоставлению содержания делящихся изотопов в ОЯТ приведем соответствующие данные по ОК-900А: масса невыгоревшего ^{235}U равна 100 кг, сумма масс ^{239}Pu и ^{241}Pu — 5,1 кг.

В табл. 4.3 приведены данные по α -активности долгоживущих актиноидов и β -активности долгоживущих продуктов деления, оцененные на основе масс радионуклидов. Эта информация дает представление о радиационных характеристиках ОЯТ, которые могут потребовать изменения технологии обращения с ОЯТ по сравнению с реакторами-прототипами. Для выявления возможных различий нами были оценены как параметры удельные α - и β -активности ОЯТ реакторов АСММ, которые определены как отношение полной активности к массе топливной композиции. В таком определении мощность источников ионизирующих излучений пропорциональна удельной активности. Как следует из табл. 4.3 и 4.4, удельные β -активности продуктов деления (как и γ -активность $^{137\text{m}}\text{Ba}$) для всех реакторов АСММ изменяются в пределах узкого интервала значений от 23 до 29 ТБк/кг, что ниже значений удельной активности ОЯТ реакторов-прототипов (от ~30 до ~42 ТБк/кг).

На основании установленных данных по накоплению активности ОЯТ водо-водяных и жидкометаллических реакторов и анализа удельной β -активности продуктов деления можно сделать второй важный вывод о том, что технология обращения с ОЯТ, используемая на реакторах-прототипах, может быть применена в транспортно-технологических схемах обращения с ОЯТ реакторов АСММ.

Недостатком исследований радиоактивности ОЯТ реакторов АСММ, выполненных с помощью программы КРАТЕР, является неполнота информации о радиоактивности гамма-излучающих радионуклидов. В частности, в программе «КРАТЕР» отсутствует алгоритм накопления радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu , которые, как показано в работе авторов [1], в существенной степени определяют радиационные характеристики упаковок с ОЯТ. Поэтому были приняты дополнительные исследования по образованию и накоплению ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ реакторов АСММ различного типа.

4.1.6. Оценка накопления гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ реакторных установках АСММ

Решение поставленной задачи базировалось на ряде упрощений, касающихся представления плотности потока нейтронов, нейтронных поперечных сечений и схем распада продуктов деления:

- активная зона реактора представляется конечным числом цилиндрических слоев; среднее по слою абсолютное значение плотности потока нейтронов, относительно которой записано уравнение кинетики накопления продуктов деления, определяется в расчетах по программе «КРАТЕР» (с учетом гетерогенности структуры слоев) последовательно на временных шагах, на которые разбивается эксплуатационный цикл активной зоны;

- образование ^{134}Cs и ^{154}Eu в реакторах водо-водяного типа (АБВ, «Униформ», РИТМ) происходит в основном в области энергий нейтронов ниже 1 кэВ (группы 8, 9 и 10 в библиотеке групповых констант программы «КРАТЕР»), а в реакторах на быстрых нейтронах типа СВБР — в интервале энергий от 1 до 700 кэВ (группы 5, 6 и 7). Соответствующие средние значения сечений поглощения нейтронов продуктов деления определены по данным библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B версии VII.1;

- выходы продуктов деления зависят от парциальных вкладов в полное число делений ядер ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu . Значения независимых выходов нуклидов — продуктов деления определяются по данным работы [17], а постоянные распада — по данным библиотеки ENDF/B-VII.1 Decay data;

- схемы распада, приводящие к образованию ^{134}Cs и ^{154}Eu , заимствованы из справочника [1].

С учетом отмеченных упрощений накопление продуктов деления можно описать системой уравнений, в которой i -е уравнение для числа ядер i -го нуклида $N_i(t)$ в слое активной зоны имеет вид [1]:

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) - \sum_j \sigma_{ij} \Phi_j(t) N_i(t) + \bar{y}_i Q(t) + \lambda_m N_m(t) + \sum_j \sigma_{mj} \Phi_j(t) N_m(t), \quad (4.1)$$

где λ_i — постоянная распада i -го нуклида; λ_m — постоянная распада m -го нуклида (ядра-предшественника) в i -й нуклид; σ_{ij} — сечение поглощения i -го нуклида в энергетической группе j ; $\Phi_j(t)$ — плотность потока нейтронов j -й группы в зоне

топлива соответствующего слоя активной зоны; \bar{y}_i — средневзвешенный независимый выход i -го нуклида при делении ядер ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu ; $Q(t)$ — скорость делений в зоне топлива соответствующего слоя активной зоны; σ_{mj} — сечение реакций поглощения нейтронов на m -м ядре с образованием i -го нуклида в группе j ; $N_m(t)$ — число ядер m -го нуклида.

При выполнении расчетов накопления нуклидов учитывался конкретный вид каждой из изобарных цепочек. При этом в качестве абсолютного независимого выхода родоначальника цепочки использовался его кумулятивный выход, включающий в себя абсолютный выход рассматриваемого нуклида и сумму абсолютных выходов его предшественников, период полураспада которых составляет пренебрежительно малую величину по сравнению с расчетным шагом по времени. Так, например, в расчетах накопления ^{134}Cs в качестве родоначальника цепочки принят ^{133}I , кумулятивный выход которого включает абсолютный выход самого нуклида и сумму абсолютных выходов радионуклидов — предшественников ^{133}Sn , ^{133}Sb , $^{133\text{m}}\text{Te}$, ^{133}Te и $^{133\text{m}}\text{I}$. При таком подходе в расчетах рассматривалась схема накопления ^{134}Cs , представленная на рис. 4.4. На этом рисунке приведены периоды полураспада нуклидов, коэффициенты ветвления и сечения реакций σ_{f10} в тепловой и σ_{fR} в резонансной области энергетического спектра. В соответствии с приведенной схемой накопление ^{134}Cs описывается системой из 6 дифференциальных уравнений.

Аналогичный подход использован в расчетах накопления ^{154}Eu , которое описывается системой из 21 уравнения.

На основе рассмотренного алгоритма для расчета накопления продуктов деления разработана математическая программа АСТФР (АСТivity of Fission Products), которая базируется на использовании стандартной подпрограммы библиотеки NAG, реализующей решение задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты — Мерсона.

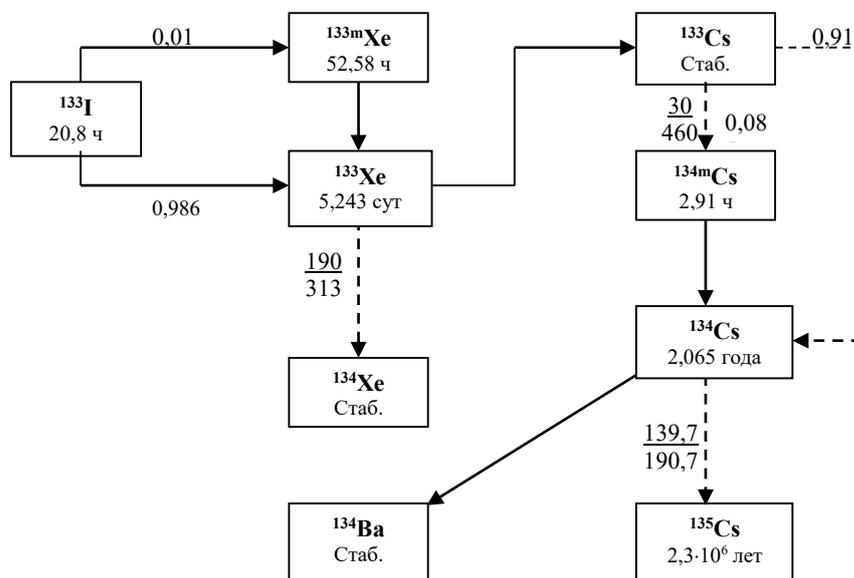


Рис. 4.4. Схема накопления ^{134}Cs [1]

Уравнения кинетики накопления ^{134}Cs и ^{154}Eu требуют дополнительных пояснений. Первое пояснение касается плотности потока нейтронов. Зависящая от времени функция ППН определяется с помощью программы «КРАТЕР» как для реакторов водо-водяного типа, так и для жидкометаллических реакторов. В качестве иллюстрации на рис. 4.5–4.7 показаны результаты расчетов ППН для групп нейтронов, которые определяют основной вклад в скорость реакций поглощения нейтронов в продуктах деления в центральной области активных зон реакторов «УниTERM», РИТМ-200М и СВБР-100. Данные получены для эксплуатационных состояний рассматриваемых реакторов. Отмечаются следующие закономерности и особенности ППН в реакторах АСММ.

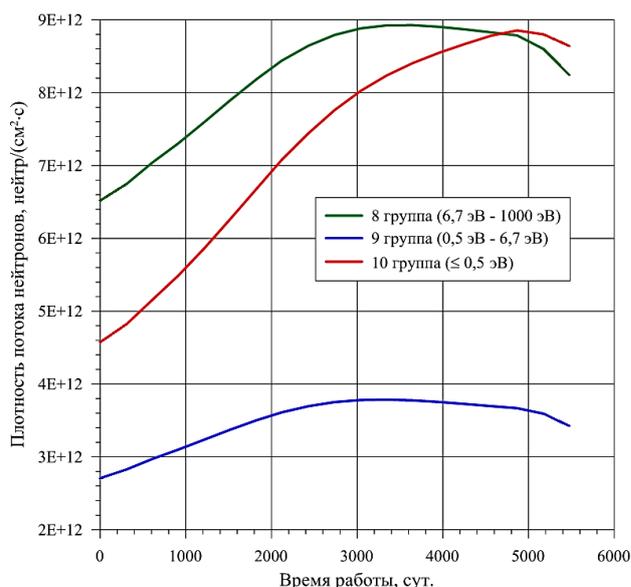


Рис. 4.5. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора «УниTERM» при мощности РУ 24,4 МВт

Во-первых, наблюдается сильный рост ППН со временем, особенно для группы нейтронов тепловых энергий (10-я группа) в случае водо-водяных реакторов, которая увеличивается от начала к концу кампании в два и более раза. Эта особенность объясняется значительным (примерно в 2,5 раза) выгоранием ^{235}U . В случае реактора типа СВБР-100 плотность потока нейтронов также растет со временем, увеличиваясь в 1,3–1,4 раза от начала к концу кампании, что соответствует уровню выгорания топлива в активной зоне. Во-вторых, следует отметить относительно низкий уровень плотности потока тепловых и замедляющихся нейтронов для водо-водяных реакторов АСММ, обусловленный низкой энергонапряженностью их активных зон.

Второе пояснение относится к подготовке нейтронных поперечных сечений и других параметров цепочек образования ^{134}Cs и ^{154}Eu . В качестве исходной информации для расчета средних групповых сечений нейтронных реакций ПД использованы данные справочника [1] и библиотеки ENDF/B-VII.1.

При этом значения сечений реакций для группы тепловых нейтронов определялись с учетом особенностей спектра ППН в тепловой области и температуры топлива в течение кампании реактора. Сечение реакций поглощения ПД в 5–9-й группах определялось осреднением по спектру $1/E$.

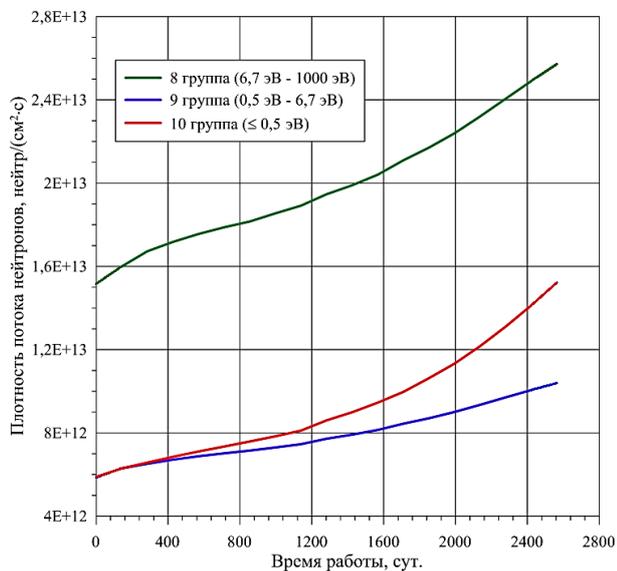


Рис. 4.6. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора РИТМ-200 при мощности РУ 113,8 МВт

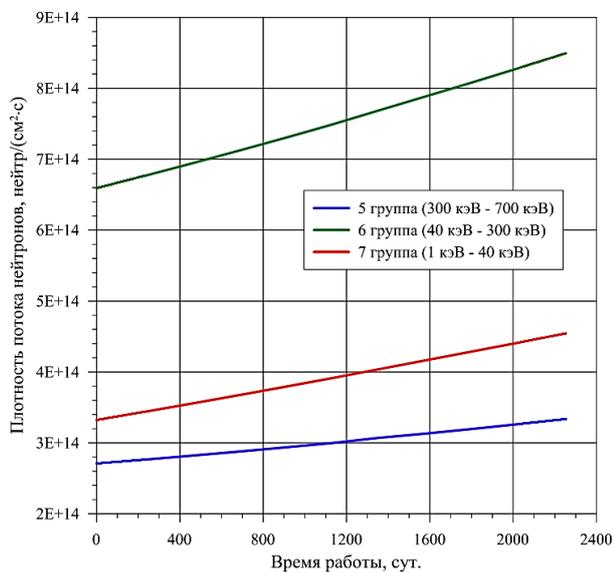


Рис. 4.7. Плотность потока нейтронов различных энергетических групп в топливе для центральной области активной зоны реактора СВБР-100 при мощности РУ 280 МВт

Использованные в расчетах параметры цепочек образования ^{134}Cs и ^{154}Eu в реакторах различного типа приведены в табл. 4.5–4.7.

Таблица 4.5

Параметры цепочки образования ^{134}Cs

Нуклид	$\lambda, \text{с}^{-1}$	$\bar{y}, \%$	$\sigma_8, \text{барн}$	$\sigma_9, \text{барн}$	$\sigma_7, \text{барн}$
Водо-водяные реакторы					
^{133}I	$9,254 \cdot 10^{-6}$	6,74	–	–	–
^{133}Xe	$1,529 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	6,28	22,6	190
$^{133}\text{C}_{\text{стаб}}$	–	–	12,0	133,0	29,04
^{134}Cs	$1,064 \cdot 10^{-8}$	–	15,8	10,0	139,7
Реактор СВБР-100					
^{133}I	$9,254 \cdot 10^{-6}$	6,91	–	–	–
^{133}Xe	$1,529 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,05	0,135
$^{133}\text{C}_{\text{стаб}}$	–	–	0,11	0,20	1,0
^{134}Cs	$1,064 \cdot 10^{-8}$	–	0,11	0,54	2,7

Таблица 4.6

Параметры цепочки образования ^{154}Eu в водо-водяных реакторах

Нуклид	$\lambda, \text{с}^{-1}$	$\bar{y}, \%$	$\sigma_8, \text{барн}$	$\sigma_9, \text{барн}$	$\sigma_{10}, \text{барн}$
^{147}Nd	$7,305 \cdot 10^{-7}$	2,22	81,9	50	440,6
$^{148}\text{Nd}_{\text{ст}}$	–	1,68	0,22	1,95	18,69
$^{150}\text{Nd}_{\text{ст}}$	–	0,728	1,75	2,64	1,04
^{147}Pm	$8,376 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$	66,17	724	167,7
$^{148\text{m}}\text{Pm}$	$1,943 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	200	1460	10618
^{148}Pm	$1,494 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-8}$	190,4	600	2000
^{149}Pm	$3,627 \cdot 10^{-6}$	1,12	150	315,7	1400
^{150}Pm	$7,183 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
^{151}Pm	$6,778 \cdot 10^{-6}$	0,478	60	1031,5	150
^{147}Sm	–	–	50	202,1	56,98
^{148}Sm	–	$1,08 \cdot 10^{-10}$	1,0	12	2,4
^{149}Sm	–	$1,28 \cdot 10^{-8}$	106	1096	87381
$^{150}\text{Sm}_{\text{ст}}$	–	$4,1 \cdot 10^{-7}$	61,47	10	100
^{151}Sm	$2,442 \cdot 10^{-10}$	$6,36 \cdot 10^{-6}$	120	1092	15170
$^{152}\text{Sm}_{\text{ст}}$	–	0,321	560	60	205,9
^{153}Sm	$4,139 \cdot 10^{-6}$	0,223	110	1682	4,073
$^{151}\text{Eu}_{\text{ст}}$	–	$9,1 \cdot 10^{-10}$	131	1000	9200,7
$^{152\text{m1}}\text{Eu}$	$2,067 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-8}$	–	–	–
^{152}Eu	$1,652 \cdot 10^{-9}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$	120	658,7	12819
$^{153}\text{Eu}_{\text{ст}}$	–	$5,8 \cdot 10^{-7}$	100	353,9	358
^{154}Eu	$2,555 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	100	313,5	1663

Наряду с удельными массами рассматриваемых радионуклидов приведены значения удельных масс стабильных ядер ^{133}Cs и ^{153}Eu , что позволяет увидеть уровень конверсии стабильных ядер в радиоактивные. Кроме того,

с целью выявления возможных различий в уровне накопления нуклидов в реакторах АСММ по сравнению с реакторами средней и большой мощности в табл. 4.8 приведены аналогичные данные для реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, полученные по данным справочника [1].

Таблица 4.7

Параметры цепочки образования ^{154}Eu в реакторе СВБР-100

Нуклид	λ, c^{-1}	$\bar{y}, \%$	$\sigma_5, \text{барн}$	$\sigma_6, \text{барн}$	$\sigma_7, \text{барн}$
^{147}Nd	$7,305 \cdot 10^{-7}$	2,22	0,11	0,40	2,2
$^{148}\text{Nd}_{\text{ст}}$	–	1,68	0,039	0,091	0,27
$^{150}\text{Nd}_{\text{ст}}$	–	0,728	0,04	0,11	0,23
^{147}Pm	$8,376 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,30	0,52	2,5
$^{148\text{m}}\text{Pm}$	$1,943 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	1,0	3,0	18,0
^{148}Pm	$1,494 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-8}$	0,18	0,82	3,5
^{149}Pm	$3,627 \cdot 10^{-6}$	1,12	0,17	0,54	2,2
^{150}Pm	$7,183 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
^{151}Pm	$6,778 \cdot 10^{-6}$	0,478	0,08	0,5	2,3
^{147}Sm	–	–	0,24	0,36	2,8
^{148}Sm	–	$1,08 \cdot 10^{-10}$	0,11	0,16	0,48
^{149}Sm	–	$1,28 \cdot 10^{-8}$	0,45	1,1	4,2
$^{150}\text{Sm}_{\text{ст}}$	–	$4,1 \cdot 10^{-7}$	0,13	0,16	1,0
^{151}Sm	$2,442 \cdot 10^{-10}$	$6,36 \cdot 10^{-6}$	0,55	1,4	2,7
$^{152}\text{Sm}_{\text{ст}}$	–	0,321	0,12	0,2	1,0
^{153}Sm	$4,139 \cdot 10^{-6}$	0,223	0,08	0,2	3,0
$^{151}\text{Eu}_{\text{ст}}$	–	$9,1 \cdot 10^{-10}$	0,9	1,7	8,0
$^{152\text{m1}}\text{Eu}$	$2,067 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-8}$	–	–	–
^{152}Eu	$1,652 \cdot 10^{-9}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$	1,1	2,4	10,0
$^{153}\text{Eu}_{\text{ст}}$	–	$5,8 \cdot 10^{-7}$	0,5	1,5	5,8
^{154}Eu	$2,555 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,55	1,8	8,0

Из табл. 4.8 видно, что накопление нуклидов ^{133}Cs и ^{153}Eu практически не зависит от типа реактора, что можно оценить как признак консервативности и надежности выполненных прогнозных оценок. Исключение составляет удельное накопление ^{153}Eu в реакторе на быстрых нейтронах СВБР-100, которое примерно в 2,5 раза меньше, чем для водо-водяных реакторов.

Мы объясняем этот эффект различием в спектрах ППН в активных зонах реакторов, которые определяют отличия в нейтронных поперечных сечениях нуклидов. Из данных табл. 4.8 следует вывод о более низкой конверсии ^{133}Cs в ^{134}Cs (3–9 %) по сравнению с конверсией ^{153}Eu в ^{154}Eu (16–21 %), что обусловлено более высокими значениями сечения поглощения нейтронов ^{153}Eu по сравнению с ^{133}Cs . Снижение накопления ^{134}Cs в РУ типа АБВ и «УниTERM» по сравнению с РУ КЛТ-40С и РИТМ-200М объясняется более сильным влиянием радиоактивного распада в случае АБВ и «УниTERM», для которых характерна более продолжительная кампания реактора.

Таблица 4.8

Сравнение удельного накопления ^{133}Cs , ^{134}Cs и ^{153}Eu , ^{154}Eu в активных зонах реакторов АСММ и реакторов коммерческих атомных станций средней и большой мощности

РУ	Энерго-выработка, ГВт·сут/т U	Удельная тепловая мощность, МВт/кг ^{235}U	Масса нуклида, г/ГВт·сут			
			^{133}Cs	^{134}Cs	^{153}Eu	^{154}Eu
ВВЭР-1000	40,5	1,0	34,1	3,87	3,29	1,22
ВВЭР-440	30	0,84	34,8	3,24	3,24	1,07
КЛТ-40С	90	0,369	34,3	3,13	3,20	0,66
РИТМ-200М	91	0,203	34,3	2,51	3,24	0,66
АБВ	94	0,166	34,6	2,02	3,13	0,55
«Униатерм»	75	0,078	34,8	1,39	3,08	0,48
СВБР-100	69	0,185	34,9	0,917	1,25	0,245

Наблюдается удовлетворительное согласие данных по накоплению ^{134}Cs в реакторах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и РУ КЛТ-40С, которые имеют близкие по продолжительности кампании активных зон — 3 и 3,9 года соответственно.

Табл. 4.9 содержит информацию об активности ^{134}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ реакторов АСММ различного типа, которая определена на основе данных табл. 4.8.

Таблица 4.9

Активность гамма-излучающих радионуклидов ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{154}Eu в ОЯТ активных зон РУ АСММ различного типа, ПБк

РУ	Энерговывработка, ГВт·сут	Радионуклид		
		^{134}Cs	^{137}Cs	^{154}Eu
		Период полураспада, лет		
		2,065	30,1	8,6
КЛТ-40С	137,5	20,56	15,74	0,908
РИТМ-200М	291,7	35,0	32,37	1,915
АБВ	131,5	13,45	14,17	0,718
«Униатерм»	131	8,93	14,23	0,648
«Униатерм»	181	13,9	18,14	0,965
СВБР-100	631	27,66	70,0	1,543

Для большей полноты характеристики гамма-излучающих радионуклидов, накапливающихся в ОЯТ реакторов АСММ, в табл. 4.9 приведены данные по активности ^{137}Cs , которые вычислены по массе ^{137}Cs , определенной ранее в пунктах 4.1.3 и 4.1.4 (табл. 4.3 и 4.4).

Полученные данные по активности гамма-излучающих радионуклидов были использованы в оценках радиационной безопасности обращения с ОЯТ реакторов АСММ.

4.2. Обоснование типа хранения ОЯТ в подземных модулях АСММ

4.2.1. Концептуальные представления об обращении с ОЯТ реакторов АСММ

Как отмечалось ранее, в основу политики России в области обращения с ОЯТ положен принцип его переработки. Сложившаяся система обращения с ОЯТ включает хранение, транспортировку и переработку. Хранение ОЯТ АЭС осуществляется в приреакторных и пристанционных хранилищах, в хранилищах бассейнового типа на комбинатах госкорпорации «Росатом» — ФГУП ГХК и ФГУП «ПО МАЯК», а хранение ОЯТ транспортных реакторов — на судах технологического обслуживания и береговых технических базах.

Переработка ОЯТ производится на заводе РТ-1 ПО «МАЯК». Перерабатываются ОЯТ реакторов ВВЭР-440, БН-600, АМБ, реакторов атомных ледоколов и подводных лодок, а также исследовательских реакторов. Отработавшее ядерное топливо перерабатывается с целью извлечения полезных компонентов для последующего их использования. Главными из них являются изотопы урана и плутония.

С целью формирования концептуальных представлений об обращении с ОЯТ реакторов АСММ выполнен анализ и обобщение результатов исследований изотопного состава отработавшего ядерного топлива реакторных установок малой мощности различного типа (АБВ, «Униатерм», КЛТ-40С, РИТМ-200, СВБР). Установлено, что ядерное топливо с начальным обогащением около 20 % по изотопу ^{235}U (для всех типов РУ) после выработки энергоресурса активных зон имеет обогащение по изотопу ^{235}U от 7 до 9 % (см. табл. 4.10).

Таблица 4.10

Сравнительная характеристика выгорания ядерного топлива в активных зонах реакторов АСММ и промышленного реактора ВВЭР-440

Изотопы	Реакторная установка					
	ВВЭР-440	«Униатерм»	АБВ	КЛТ-40С	РИТМ-200М	СВБР-10
Масса изотопов урана и плутония в конце кампании активных зон, кг/т*						
^{235}U	12,7	68	63	77	76	125
^{236}U	4,28	23,4	18,7	18,9	19,3	12,2
^{238}U	942	769	808	796	795	771
^{239}Pu	5,49	7,82	7,0	8,58	8,98	27,3
^{240}Pu	1,98	2,77	2,5	2,47	2,57	1,18
^{241}Pu	1,28	2,14	1,84	2,10	2,23	0,043
^{242}Pu	0,37	0,79	0,53	0,46	0,49	<0,01
Выгорание изотопов урана начальной загрузки топлива, кг/т						
^{235}U	23,3	120	102	98	99	62
^{238}U	22	34,3	28,8	31	30	42

* Начальной загрузки урана.

Такое обогащение ОЯТ превышает начальное обогащение топлива коммерческих АЭС с реакторами ВВЭР-440, что показывает целесообразность хранения ОЯТ из реакторов АСММ с последующей переработкой, а не захоронением.

Важным результатом выполненного анализа является определение содержания изотопов плутония в ОЯТ. Установлено, что 1 т ОЯТ из реакторов АСММ содержит плутония примерно в 1,5 раза больше, чем 1 т ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Эта особенность также определяет необходимость переработки ОЯТ реакторов АСММ.

Возможные решения по хранению ОЯТ в подземных комплексах АСММ были изучены по материалам проектов подземных АСММ, разработанных предприятиями Минатома (Росатома) и институтами РАН в рамках программы «Экологически чистая энергетика» и представленных в 1993 г. на конкурс по созданию подземных станций для нужд энергетики России.

Выполненный анализ материалов проектов позволил сформулировать основные концептуальные положения по хранению ОЯТ, которые рассматриваются на начальной стадии работ по подземным атомным станциям:

- создание хранилищ для ОЯТ предусматривается в подземной части АЭС;
- хранилища для ОЯТ проектируются на весь срок службы станции;
- на подземной АЭС обустраиваются хранилища двух типов: первое, стеллажное хранилище отработавших тепловыделяющих сборок в водном бассейне для охлаждения топлива на стадии значительных энерговыделений (1–10 лет), второе, сухое хранилище контейнерного типа, рассчитанное на весь объем ОЯТ.

Развитие работ по РУ и созданию АСММ на их основе оказало существенное влияние на концептуальные представления о хранении ОЯТ. Так, емкость хранилищ планируется только на объем ОЯТ, образующегося в перегрузках в течение межремонтного периода эксплуатации станции. При этом возможно исключение перегрузок и хранения ОЯТ, как это предполагается, например, в проектных разработках РУ «Униатерм». Другое изменение концепции относится к водным хранилищам — бассейнам выдержки ОЯТ. Для реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых эвтектикой Рb-Вi (СВБР), доказана возможность сухого хранения в течение всего периода хранения после выгрузки ОЯТ из активной зоны.

4.2.2. Обоснование хранения ОЯТ реакторов АСММ в контейнерах ТУК-120

Ранее (см. пункт 4.1.5) по результатам анализа удельной активности продуктов деления обоснован вывод о применимости технологии, используемой на реакторах-прототипах, в транспортно-технологических схемах обращения с ОЯТ реакторов АСММ. Прототипными для РУ «Униатерм», АБВ и РИТМ-200 рассматриваются реакторы атомных ледоколов. Примером хранения ОЯТ прототипных РУ является береговое «сухое» хранилище контейнерного типа на ФГУП «Атомфлот», построенное для размещения неперерабатываемого уранциркониевого топлива реакторов атомных ледоколов, которое длительно хранилось на ПТБ «Лотта». Береговое хранилище ОЯТ ледокольного флота (ХОЯТКТ) было построено в 2006 г. по российско-британскому проекту на берегу Кольского залива. Комплекс ХОЯТКТ представляет собой отдельно стоящее здание с размерами 66×30,7 м, построенное на свайном основании. В здании имеются отделения входного контроля, обслуживания и хранения. Береговой

комплекс рассчитан на 50 лет хранения ОЯТ. Отработавшее топливо, накопленное в ходе эксплуатации ледоколов «Ленин», «Арктики» и «Сибирь», хранится в транспортно-упаковочных комплектах ТУК-120 в сухих условиях. Хранилище полностью загружено в июне 2015 г. и вмещает 50 ТУКов.

Контейнер ТУК-120 — это металлобетонный контейнер, который представляет собой цилиндрическую конструкцию, состоящую из корпуса и двух крышек (рис. 4.8).

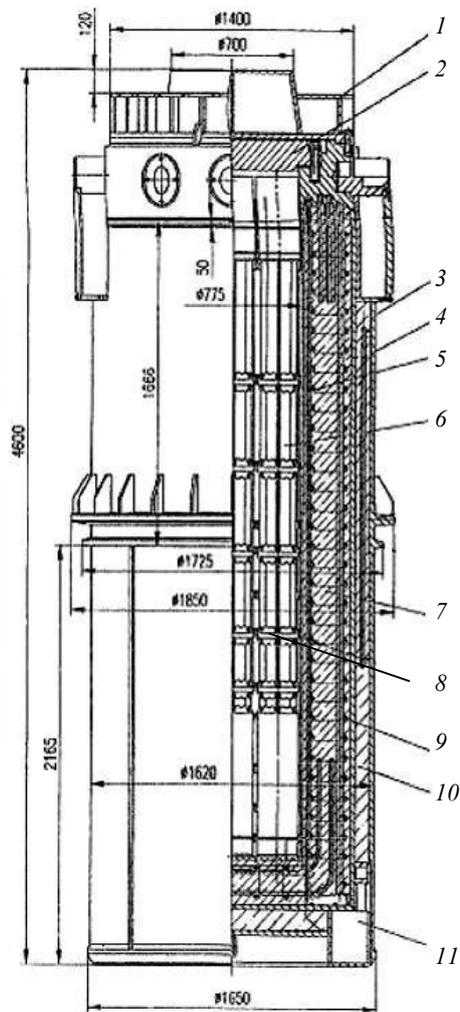


Рис. 4.8. Контейнер ТУК-120 [18, 19]:

- 1 — наружная крышка; 2 — внутренняя крышка; 3 — экранирующая оболочка (толщина 25 мм, сталь 09Г2СА-А); 4 — силовая оболочка (толщина 25 мм, сталь 09Г2СА-А); 5 — внутренняя оболочка (толщина 16 мм, сталь 12Х18Н10Т); 6 — чехол с ТВС; 7 — жесткоармированный бетон класса В90 по прочности и D4100 по плотности (толщина 270 мм); 8 — дистанционирующая решетка; 9 — армирующий каркас; 10 — бетон класса В80 по прочности и D3400 по плотности (толщина 85 мм); 11 — днище

Корпус контейнера является металлобетонной конструкцией в форме цилиндрической емкости с днищем. Силовая часть металлоконструкции корпуса выполнена из двух цилиндрических стальных оболочек: внутренней толщиной 16 мм и наружной толщиной 25 мм. Полость между оболочками толщиной 270 мм выполнена армированным особо прочным бетоном плотностью 4,1 г/см³. Снаружи контейнера установлена экранирующая стальная оболочка толщиной 25 мм. Зазор между экранирующей и силовой оболочками толщиной 85 мм заполнен бетоном плотностью 3,4–3,7 г/см³ [18, 19]. Параметры металлобетонной защиты контейнера ТУК-120 приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Геометрия и материалы слоев
металлобетонной защиты контейнера ТУК-120

Элемент конструкции	Толщина слоя, см	Радиальные размеры, см	Материалы	Плотность, г/см ³
Стальная оболочка	1,2	37,55–38,75	Сталь 1Х18М10Т	7,85
Внутренняя обечайка	1,6	38,75–40,35	Сталь 1Х18М10Т	7,85
Армированный (12 % об.) «тяжелый» бетон	27	40,35–67,35	Бетон В90, сталь	4,55
Стальная обечайка	2,5	67,35–69,85	Сталь углеродистая 09Г2СА-А	7,85
«Тяжелый» бетон	8,5	69,85–78,35	Бетон В60	3,40
Внешняя стальная обечайка	2,5	78,35–80,85	Сталь углеродистая 09Г2СА-А	7,85

Внутренняя полость, предназначенная для размещения семи чехлов с отработавших ТВС, имеет диаметр 775 мм и высоту 3530 мм. Чехлы предназначены для упорядоченного размещения в них отработавших тепловыделяющих сборок в вертикальном положении. Чехол представляет собой стальную конструкцию высотой 3500 мм и диаметром примерно 240 мм, состоящую из трубного блока и пробки. Трубный блок состоит из 7 труб диаметром 76 мм с толщиной стенки 3 мм. Материал чехлов — коррозионностойкая сталь ОХ18М10Т. ТВС в чехлах размещаются в два яруса, а сами чехлы — в цилиндрической выемной стальной части с днищем в виде трубной доски с семью отверстиями под чехлы.

Масса загруженного контейнера — не более 40 т. Каждый ТУК-120 при двухъярусном заполнении активными частями ТВС вмещают до 70 чехлов. В хранилище контейнерного типа на ФГУП «Атомфлот» контейнеры размещаются в отсеке высотой 4,8 м и расположены с шагом 2,35 м и расстоянием между рядами 2,7 м [20].

При хранении ОЯТ ледокольного флота в ХОЯТКТ обеспечивается ядерная и радиационная безопасность персонала и населения.

Безопасность персонала и окружающей среды обеспечивается в основном за счет защитных свойств ТУКа. Конструкция упаковки автономно обеспечивает в заданных пределах подкритичность, теплоотвод, радиационную защиту, удержание радионуклидов при нормальной эксплуатации, проектных и запроектных авариях.

При разработке проекта ХОЯТКТ были приняты следующие критерии обеспечения требований ядерной и радиационной безопасности при обращении с ОЯТ [20]:

- коэффициент размножения нейтронов не должен превышать значения 0,95 в условиях нормальной эксплуатации и проектных авариях;
- радиационная безопасность обеспечивается специальной конструкцией ТУК-120.

Тип хранения ОЯТ ледокольного флота («сухое», в контейнерах ТУК-120) и проектные решения по обеспечению безопасности в ХОЯТКТ использованы в дальнейшем в оценках радиационной, ядерной и тепловой безопасности хранения ОЯТ РУ подземных АСММ, а также при обосновании конструктивно-компоновочных решений подземных модулей хранилищ ОЯТ.

Особенность размещения ОЯТ РУ АСММ в контейнерах ТУК-120 обусловлена типом и размерами применяемых в активных зонах реакторов ТВС (см. табл. 4.1), что определяет различия в числе ТВС, размещающихся в контейнерах для различного типа РУ. Так, для РУ «УниTERM» рассматривается ТВС, аналогичная ТВС реактора атомного лихтеровоза «Севморпуть», в виде пучка стержневых ТВЭЛ, заключенного в трубу диаметром 60 мм. Для размещения ТВС реакторов РУ «УниTERM» может быть применен пятиместный чехол типа 34М, имеющий диаметр 235 мм, вмещающий 5 ТВС в трубках диаметром 76 мм. Таким образом, в ТУК-120 с ОЯТ реактора «УниTERM» при двухъярусном размещении топливных частей в трубах чехлов может содержаться — 70 ТВС, как и в ТУК-120 ХОЯТКТ. При использовании семиместных чехлов типа 21 загрузка контейнера может составлять 98 ТВС. В реакторах типа АБВ, КЛТ-40С, РИТМ-200М применена ТВС кассетного типа с размером под ключ 100 мм. В чехлах диаметром примерно 240 мм можно размещать не более трех ТВС, в контейнере ТУК-120 при их двухъярусном размещении — не более 42. В реакторах типа СВБР кассета имеет размер «под ключ» 200 мм и в чехлах типа 34М может разместиться 14 ТВС (при двухъярусной компоновке).

Необходимо отметить, что принятые размеры чехлов для размещения ТВС из РУ АБВ и РИТМ-200М требуют конструкторско-технологического обоснования, которое должно выполняться при проектировании.

Полученные значения максимальных загрузок контейнера ТУК-120 отработавшими тепловыделяющими сборками при применении имеющейся на ледокольном атомном флоте инфраструктуры по обращению с ОЯТ будут использоваться в качестве исходных данных в оценках безопасности хранения ОЯТ РУ подземных АСММ.

4.2.3. Характеристика контейнерного хранения ОЯТ в подземных модулях АСММ

В материалах ОВОС при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем СВБР-100 [21] схема обращения с ОЯТ представлена следующим образом. Топливо выгружается из реактора через 1 месяц после вывода реактора из эксплуатации и помещается в приреакторное хранилище ТВС (в пеналах с расплавом свинца), расположенное в реакторном блоке. За 60-летний срок службы станции предусмотрены три выгрузки

с интервалом 7–8 лет. Через 24 года после пуска реактора пены с ОЯТ перегружаются в ТУКи и ОЯТ направляется на переработку. Необходимость в контейнерном хранилище в такой версии обращения с ОЯТ отсутствует.

Если при использовании РУ СВБР-100 для подземной АСММ рассматривать версию контейнерного хранения ОЯТ в течение всего срока службы станции, то на основе данных ОВОС можно оценить число контейнеров и размеры подземного модуля для их размещения.

При сроке службы станции 60 лет всего будет отработано примерно 7 активных зон (427 ТВС). В случае применения ТУК-120 с двухъярусным размещением ТВС в чехлах для размещения 427 ТВС потребуется 31 контейнер. С учетом возможного наличия негерметичных сборок число контейнеров необходимо увеличить до 32 штук. Предполагая расстановку контейнеров, как в ХОЯТКТ, по прямоугольной решетке с шагом 2,35 м в 4 ряда по 8 контейнеров в ряду и расстоянием между рядами 2,7 м, можно получить следующие величины поперечных размеров модуля хранилища: длина ~19 м, ширина ~11 м.

В оценках радиационной безопасности модуля время выдержки ОЯТ следует принимать равным времени топливного цикла (7 лет). Активность гамма-излучающих продуктов деления в ТУК-120 с ОЯТ РУ СВБР-100 при учете распада за 7 лет составляет примерно 14,5 ПБк. Эта активность, которая определяется распадом цепочки $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$, а также распадом ^{134}Cs и ^{154}Eu , оценивается по данным табл. 4.6, задает интенсивность источников гамма-излучения в ТУК-120. Интенсивность источников нейтронов спонтанных делений по оценкам, согласно данным о массах радионуклидов (табл. 4.4), равна $4,75 \cdot 10^6$ нейтр/с. Основными вкладчиками являются ^{240}Pu (89 %) и ^{238}Pu (11 %).

В случае применения для подземной АСММ реакторной установки СВБР-10 при сроке службы станции 40 лет (см. табл. 4.1) и времени между перегрузками 20–21 год будет отработываться всего две активные зоны. При компоновке активной зоны 27-ю ТВС число образующихся ТВС составит ориентировочно 56 штук, для их размещения в пенах с расплавом свинца потребуется 4 контейнера с 14 пенами в каждом.

Возможны две версии обращения с ОЯТ: первая — отправка топлива на переработку через 21–24 года после ввода станции в эксплуатацию, как для СВБР-100; вторая — контейнерное хранение в течение срока службы АСММ. Для размещения контейнеров ТУК-120 потребуется модуль с поперечными размерами 4,7×5,4 м.

Время выдержки ОЯТ в оценках безопасности следует принимать равным примерно 19 годам.

В проектах АСММ с реакторами водо-водяного типа предусматриваются приреакторные хранилища для обеспечения снижения радиоактивности и остаточных тепловыделений и уровней ионизирующих излучений. Для РУ с водой под давлением рассматриваются циклические режимы эксплуатации. За один цикл РУ отработываются одна (как в РУ «УниTERM», АБВ) или несколько АЗ, как в КЛТ-40С. Длительность топливного цикла для РУ «УниTERM» и АБВ совпадает с продолжительностью заводского ремонта. После завершения топливного цикла и необходимой выдержки топливо перегружается в контейнеры и вывозится на утилизацию или хранится в контейнерах в подземном модуле до вывода атомной станции из эксплуатации. Для всех разрабатываемых РУ

АСММ с реакторами водо-водяного типа характерна большая по величине продолжительность топливного цикла 7–10 или более лет. Учитывая такие особенности АСММ с реакторами типа ВВЭР, время выдержки ОЯТ в приреакторных хранилищах принимается равным времени топливного цикла эксплуатации РУ: 12 лет для АБВ, 7 лет для РИТМ-200М и 21 год для РУ «УниTERM».

Особенностью реакторов водо-водяного типа АСММ является глубокое выгорание топлива (более высокое, чем в РУ-прототипах) со значительным накоплением в ОЯТ ^{244}Cm , а также ^{137}Cs . Отметим, что спонтанное деление ^{244}Cm на 95 % определяет интенсивность источников нейтронов в контейнерах с ОЯТ реакторов этого типа.

Контейнеры, заполняющие подземные модули, обеспечивают в основном безопасность персонала и окружающей среды и, по существу, являются мини-хранилищами ОЯТ. Мощности дозы на поверхности контейнера от γ -квантов и нейтронов являются ключевыми параметрами, характеризующими радиационную безопасность хранилища. Для расчета мощности дозы на поверхности контейнера требуется информация по активности гамма-излучающих радионуклидов и интенсивности нейтронов спонтанных делений ^{244}Cm , ^{238}Pu и ^{240}Pu в контейнерах с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа. Оцененные значения этих параметров для принятых времен выдержки ОЯТ приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Характеристика источников ионизирующих излучений
в контейнере ТУК-120 с ОЯТ РУ АСММ

Тип РУ (энерговыработка, ГВт·сут)	Время выдержки, лет	Число ТВС	Активность γ -излучающих радионуклидов, ПБк			Интенсивность источников нейтронов СД	
			^{134}Cs	^{137}Cs	^{154}Eu	полная, нейтр/с	удельная, нейтр/см ³ ·с
КЛТ-40С (137,5)	3,9	70	1,92	5,0	0,230	$6,97 \cdot 10^7$	60,5
РИТМ-200М (291,7)	7	42	0,718	5,81	0,230	$9,60 \cdot 10^7$	65,5
АБВ (131,5)	10	42	0,1628	3,91	0,1113	$6,52 \cdot 10^7$	56,6
АБВ (131,5)	12	42	0,083	3,74	0,0854	$6,04 \cdot 10^7$	52,4
«УниTERM» (134)	15	70	0,0154	2,66	0,0511	$4,20 \cdot 10^7$	43,1
«УниTERM» (181)	20,6	70	0,00234	2,98	0,0484	$7,85 \cdot 10^7$	80,5
СВБР-100 (631)	7	14	0,617	13,67	0,200	$4,75 \cdot 10^7$	5,96
СВБР-100 (631)	21	14	0,00546	9,903	0,0652	$4,62 \cdot 10^6$	5,80

Примечание. СД — спонтанные деления.

Исследования мощности дозы от гамма-излучения выполнялись для РУ различного типа. При этом с учетом эволюции проектов АСММ в последние годы список изучаемых РУ был расширен по сравнению с тем, который рассматривался ранее при изучении радиоактивности ОЯТ. Так, для РУ «УниTERM» рассматриваются варианты, отличающиеся энерговыработкой АЗ и временем выдержки ОЯТ. Для РУ АБВ и СВБР дополнительно включены

варианты с различным временем выдержки облученного топлива, позволяющие сравнить дозовые характеристики ТУК-120 при вариации основных параметров топливных циклов активных зон.

Таким образом, определены радиационные характеристики ОЯТ в контейнерах ТУК-120, которые использованы в качестве исходных данных для оценки радиационной безопасности подземных хранилищ ОЯТ РУ АСММ различного типа.

4.3. Оценка радиационной безопасности подземных хранилищ контейнерного типа для ОЯТ АСММ

Оценка радиационной безопасности на первом этапе предполагает расчет мощности дозы на поверхности одиночного контейнера и в его ближней зоне как от гамма-излучения, испускаемого при радиоактивном распаде продуктов деления, так и от нейтронов, рождающихся при спонтанных делениях актиноидов (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{244}Cm). В качестве метода расчета принимается математическое моделирование процессов переноса гамма-квантов и нейтронов в защитных экранах контейнера ТУК-120, позволяющее получить информацию о потоках и мощности дозы в контейнере и его окрестности, рассматриваемой как зону работы обслуживающего персонала. На втором этапе проводится сравнение вычисленных значений суммарной мощности дозы от гамма-квантов и нейтронов с предельно допустимыми уровнями. Это позволяет установить приемлемость принятых решений по количеству ТВС в контейнерах и расстановке контейнеров в модуле хранилища ОЯТ.

4.3.1. Мощность дозы от гамма-излучения

Исследования мощности дозы от гамма-излучения выполнялись на основе методического подхода, разработанного в Горном институте, который реализован в математической программе DOZRAD, позволяющей учитывать геометрию источника и защиты.

Контейнер ТУК-120 имеет цилиндрическую форму как внутренней выемной части, в которой располагаются ТВС и которая является источником гамма-квантов, так и внешней (корпус контейнера), образованной чередующимися кольцевыми слоями стали и бетона и являющейся защитой от ионизирующих излучений.

Исходя из геометрических параметров контейнеров с ОЯТ, поставленная задача решается применительно к цилиндрическому источнику и защите в виде цилиндрического слоя (корпус контейнера). Для определения функционала поля излучения используется наиболее распространенный в физике защиты от гамма-излучения метод, основанный на экспоненциальном законе ослабления потока первичных (нерассеянных) гамма-квантов.

Алгоритм решения этой задачи основан на формализованном представлении функции ослабления излучения, учитывающей самопоглощение излучения в источнике и поглощение в защите. Объемный источник представляется суперпозицией точечных изотропных источников, и определение функционала поля излучения сводится к интегрированию функции ослабления точечного изотропного источника по объему цилиндрического источника. При выводе этой

функции предполагается равномерность распределения удельной интенсивности гамма-излучения по объему источника, его изотропность, моноэнергетичность излучения и однородность материала защиты. В соответствии с обозначениями на рис. 4.9 плотность потока нерассеянного излучения Φ в точке А в радиальном направлении в плоскости нижнего основания самопоглощающего моноэнергетического цилиндрического источника определяется следующим выражением [22]:

$$\Phi = \frac{S_v}{4\pi} \int_0^R \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\mu_s x} \cdot e^{-\mu y} \rho d\rho dz d\varphi}{z^2 + \rho^2 + b^2 - 2\rho b \cos \varphi}, \quad (4.2)$$

где S_v — удельная интенсивность источника излучения; x и y — путь гамма-квантов в источнике и защите соответственно; μ_s — коэффициент ослабления излучения в источнике; μ — коэффициент ослабления излучения в защите.

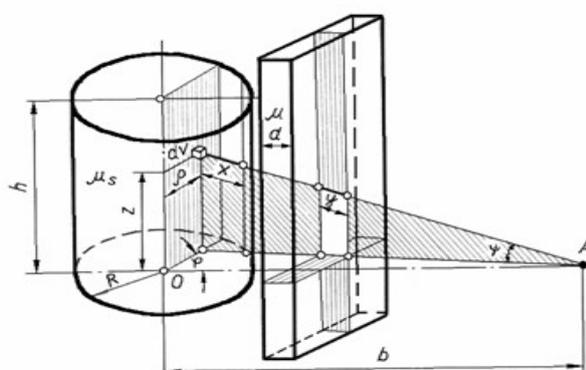


Рис. 4.9. Схема к расчету ослабления в защите излучения цилиндрического источника в радиальном направлении [21]

Путь γ -квантов в защите (y) является одним из основных параметров, определяющих ослабление излучения в корпусе контейнера. Математическое описание этого параметра в первой версии программы DOZRAD базировалось на модельном представлении корпуса контейнера в виде плоского слоя защиты толщиной d (см. рис. 4.9). В соответствии с конструкцией контейнеров для ОЯТ, создаваемых отечественной промышленностью, алгоритм программы DOZRAD был модернизирован в части определения пути фотонов в защитном экране (корпусе контейнера) цилиндрической формы.

Применение значений γ -постоянных для гамма-излучающих радионуклидов позволяет получить величину мощности эффективной дозы нерассеянного моноэнергетического излучения P_γ в произвольной точке А (рис. 4.9) из выражения

$$P_\gamma = A_V \cdot \Gamma \cdot I_3,$$

где A_V — удельная объемная активность радионуклида в источнике; Γ — гамма-постоянная моноэнергетической линии спектра γ -излучения; I_3 — тройной интеграл в выражении (4.2).

Учет вторичного гамма-излучения, формирующегося при комптоновском рассеянии первичных γ -квантов, производится с помощью дозовых факторов накопления точечных изотропных источников B_δ , используя предложенное Тейлором [22] двухэкспоненциальное представление таких факторов:

$$B_\delta = A_1 \exp(-\alpha_1 \cdot \mu \cdot d) + (1 - A_1) \exp(-\alpha_2 \cdot \mu \cdot d). \quad (4.3)$$

Коэффициенты A_1 , α_1 и α_2 , зависящие только от энергии гамма-квантов и материала защиты, приводятся в справочной литературе для различных сред (бетон, железо, свинец и др.). Использование такой аппроксимации приводит к интегралу того же вида, что и при решении задачи без учета рассеянного излучения (4.2). При таком подходе конечное выражение для плотности потока $\Phi_{\text{полн}}$ с учетом нерассеянного и рассеянного излучения имеет вид:

$$\Phi_{\text{полн}} = A_1 \cdot \Phi(\mu' \cdot d) + (1 - A_1) \Phi(\mu'' \cdot d), \quad (4.4)$$

где $\mu' = (1 + \alpha_1)\mu$ и $\mu'' = (1 + \alpha_2)\mu$.

Указанный способ учета рассеянного излучения применим и для описания функционала поля излучения внутри объемного самопоглощающего источника.

Таким образом, для учета рассеянного излучения с помощью аналитического представления фактора накопления необходимо знание соответствующих данных для материалов источника и защиты. Принятая методика расчета функционала поля излучения предполагает использование модельного представления гетерогенных зон источника и защиты в виде однородных смесей. В этом случае для учета рассеянного излучения требуется определение эквивалентного элемента, имеющего такие же свойства взаимодействия с гамма-излучением, как и данная смесь, и для которого известны параметры фактора накопления.

Для решения этой задачи используется методика, предложенная Г. Гольдштейном [23], в соответствии с которой отправной точкой для определения эквивалентного Z является вычисление зависимости массового коэффициента поглощения смеси $\bar{\mu}$ от энергии гамма-квантов по формуле

$$\bar{\mu} = \sum_i \bar{\mu}_i \omega_i, \quad (4.5)$$

где $\bar{\mu}_i$ — массовый коэффициент поглощения i -го элемента с массовой долей ω_i в составе смеси.

Форма кривой $\bar{\mu}$ сравнивается с соответствующими кривыми для отдельных элементов путем построения зависимости отношения $\bar{\mu}$ к $\bar{\mu}_0$ (массовый коэффициент поглощения при заданной моноэнергетической линии спектра излучения E_0) от энергии гамма-квантов E , пока не будет получено приемлемое совпадение в интересующей нас энергетической области. Для полной эквивалентности нужно не только, чтобы кривые полного сечения имели одинаковую форму, но в обоих случаях должны иметь то же самое значение

отношения полных сечений $\bar{\mu}$ к сечениям рассеяния $\bar{\mu}_{sc}$. Когда кривые $\bar{\mu}$ имеют одинаковую форму, второе условие удовлетворяется, если совпадают значения $\bar{\mu}/\bar{\mu}_{sc}$ при E_0 .

Рассмотренный алгоритм положен в основу программы DOZRAD, в которой для численного решения интеграла вида I_3 используется стандартная подпрограмма из библиотеки Fortran Power Station, реализующая интегрирование функции по гипертреугольнику.

Верификация программы DOZRAD была выполнена по данным о мощности дозы гамма-излучения на поверхности контейнера ТУК-84, который был разработан и изготовлен для хранения и транспортировки ОЯТ реакторов АМБ Белоярской АЭС. Результаты расчетов по программе DOZRAD и расчетов методом Монте-Карло, выполненных специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) [24], показали расхождение в мощности дозы в пределах 5 % [25]. Причинами такого расхождения являются гомогенность состава источника излучения в приближенных расчетах, приблизительный расчет накопления рассеянных гамма-квантов и др. Вместе с тем выявленные отклонения находятся в пределах погрешностей в расчетах ослабления γ -излучения, обусловленных неточностями современных данных о микроскопических сечениях взаимодействия излучения с веществом.

Выполнение расчетных исследований в настоящей работе потребовало определения следующих исходных данных:

- материальный состав областей источника и защиты;
- характеристика спектрального состава гамма-квантов, испускаемых при распаде ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{154}Eu ;
- коэффициенты ослабления гамма-излучения для областей источника и защиты.

Материальный состав области источника, содержащей ТВС из активных зон различных реакторов АСММ, определялся по данным о массовом составе ТВС (табл. 4.2), числе ТВС в контейнере (табл. 4.11), типе и размерах упаковок для размещения ТВС, а также по данным о внутрикорпусных конструкциях ТУК-120 [26]. В качестве материалов упаковок для ТВС и дистанционирующих решеток принята сталь 1Х18Н10Т. Результаты оценки массового состава области источника в форме парциальных (средних) плотностей элементов приведены в табл. 4.13.

Для расчета массового элементного состава защиты контейнера, состоящей из выемной части, трех стальных оболочек и двух слоев тяжелого бетона (табл. 4.11), были использованы данные, приведенные в патентах [27, 28]. Оцененные данные по составу бетонов и металлобетонной защиты контейнера приведены в табл. 4.14.

Следует отметить, что на данном этапе НИР с учетом преимущественного относительного содержания железа в составе металлобетонной защиты контейнера дозовый фактор накопления определялся по этому элементу.

Для оценки дозовых характеристик поля γ -излучения рассматривались моноэнергетические линии спектра излучения радионуклидов, которые характеризуются наибольшим квантовым выходом.

Таблица 4.13

Характеристики активной части ТУК-120
для различных РУ АСММ («сухое» состояние, размещение ТВС
в два яруса, радиус активной части — 37,55 см)

Элемент	Тип РУ					
	КЛТ-40С	«УниTERM»-134	«УниTERM»-181	АБВ	РИТМ-200М	СВБР-100
	Число ТВС (высота активной части, см)					
	70 (260)	70 (220)	70 (220)	42 (260)	42 (330)	14 (180)
Средняя плотность элемента (ρ), г/см ³						
О	0,0548	0,063	0,0576	0,0566	0,0622	0,356
Al	0,101	0,088	–	0,135	0,112	–
Fe	0,671	1,318	1,002	0,671	0,623	1,041
Zr	0,489	0,0944	0,657	0,462	0,462	–
Pb	–	–	–	–	–	1,703
U	0,462	0,468	0,428	0,420	0,462	2,645
Средняя плотность источника, г/см ³	1,7778	2,031	2,1446	1,7446	1,7212	5,745

Таблица 4.14

Массовый элементный состав бетонов
и металлобетонной защиты контейнера ТУК-120, г/см³

Элемент	Тяжелый армированный (12 % об.) бетон	Тяжелый бетон	Металлобетонная защита	
			средняя плотность, г/см ³	относительное массовое содержание
H	0,01698	0,0224	0,01513	0,0031
O	1,2492	1,2088	1,0056	0,20586
Al	0,0176	0,0159	0,01383	0,00283
Si	0,0616	0,0561	0,04872	0,00997
Ca	0,2607	0,2358	0,2058	0,04213
Fe	2,944	1,861	3,5958	0,73611
Средняя плотность, г/см ³	4,55	3,40	4,885	

Характеристики спектрального состава гамма-квантов, испускаемых при распаде ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs и ¹⁵⁴Eu, определялись на основе данных библиотеки ENDF/B-VII.1 Decay Data. Параметры распада ¹³⁴Cs и ¹⁵⁴Eu для рассматриваемых энергетических линий приведены в табл. 4.15.

С учетом оценочного характера расчетов спектрального состава гамма-излучения были приняты упрощения, в соответствии с которыми моноэнергетические линии излучения отдельных радионуклидов определялись на основе группировки дифференциальных характеристик.

Таблица 4.15

Параметры распада радионуклидов ^{134}Cs и ^{154}Eu
по данным библиотеки ENDF/D-VII.1 Decay Data

Энергия γ -квантов, МэВ	Выход энергии, МэВ/расп.	Энергия γ -квантов, МэВ	Выход энергии, МэВ/расп.
^{134}Cs		^{154}Eu	
0,6047	0,5903	0,5918	0,04534
0,7958	0,6802	0,7233	0,15933
0,8019	0,06968	0,7568	0,03458
1,0386	0,01039	0,8732	0,13066
1,168	0,02091	1,005	0,1287
1,365	0,04119	1,1286	0,008975
		1,274	0,45709
		1,494	0,011085
		1,595	0,02679

На основе такого подхода был определен дискретный набор из 9 энергетических линий, характеристики которых приведены в табл. 4.16.

Таблица 4.16

Расчетные параметры спектральных характеристик
источника гамма-излучения

Энергия γ -квантов, МэВ	Излучающий нуклид	Выход энергии, МэВ/расп.	Гамма-постоянная, $\text{P}\cdot\text{см}^2/(\text{ч}\cdot\text{Ки})$
0,6	^{134}Cs	0,5903	4142
	^{154}Eu	0,04534	228
0,662	$^{137}\text{Cs}^*$	0,563	3192
0,723	^{154}Eu	0,19391	1107
0,8	^{134}Cs	0,74988	4178
0,873	^{154}Eu	0,13066	711,5
1,0	^{134}Cs	0,01039	55,5
	^{154}Eu	0,13768	1547
1,274	^{154}Eu	0,45709	2351
1,3	^{134}Cs	0,0621	318,0
1,6	^{154}Eu	0,03788	199,5

* С учетом $^{137\text{m}}\text{Ba}$.

На основе данных, приведенных в табл. 4.13, 4.14 и 4.16, и данных библиотеки ENDF/B-VI выполнена оценка значений линейных коэффициентов ослабления гамма-излучения в источнике и защите, представляемых в виде гомогенных смесей. Результаты этой оценки приведены в табл. 4.17.

Результаты расчетов дозовых характеристик поля излучения контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов АСММ различного типа, выполненных с использованием

рассмотренных ранее исходных данных, приведены в табл. 4.18 в виде мощности дозы в радиальном направлении в плоскости центрального сечения источника гамма-излучения.

Таблица 4.17

Линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения
в зонах модели контейнера ТУК-120, см⁻¹

Тип РУ	Энергия гамма-квантов, МэВ								
	0,6	0,662	0,723	0,8	0,873	1,0	1,274	1,3	1,6
Источник излучения									
КЛТ-40С	0,1634	0,1513	0,1413	0,1309	0,1234	0,1122	0,0965	0,0952	0,0854
«УниTERM-134»	0,1832	0,1703	0,1599	0,1487	0,1409	0,1283	0,1109	0,1093	0,0981
«УниTERM-181»	0,1887	0,1757	0,1650	0,1537	0,1455	0,1330	0,1151	0,1135	0,1021
АБВ	0,1584	0,1470	0,1375	0,1276	0,1205	0,1098	0,0946	0,0933	0,0873
РИТМ-200М	0,1592	0,1473	0,1375	0,1273	0,1199	0,1090	0,0936	0,0923	0,0828
СВБР-100	0,6718	0,6006	0,5459	0,4914	0,4524	0,3990	0,3297	0,3247	0,2883
ТУК-120	Металлобетонная защита в радиальном направлении								
	0,3772	0,3599	0,3468	0,3302	0,3186	0,2964	0,2632	0,2599	0,2346

Заслуживают внимания и обсуждения несколько установленных особенностей и закономерностей.

Основной результат заключается в том, что величина мощности эффективной дозы на поверхности контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов АСММ всех типов не превышает предельно допустимых значений для их перевозки на условиях обычного использования. Так, при допустимой величине мощности дозы на поверхности упаковок 2 мЗв/ч при их транспортировании на условиях обычного использования [29] значения мощности дозы на поверхности контейнера ТУК-120 варьируются от 0,047 (ОЯТ реактора СВБР-100 при выдержке 21 год) до 0,4 мЗв/ч (ОЯТ реактора КЛТ-40С). Другим параметром, который определяет условия перевозки радиоактивных материалов, является транспортный индекс. В соответствии с нормативным документом [29] значение этого параметра определяется умножением максимальной мощности гамма-излучения (мЗв/ч) на расстоянии 1 м от поверхности контейнера на 100. Из данных табл. 4.18 следует, что и по этому параметру перевозка рассматриваемых типов ОЯТ в контейнерах ТУК-120 может осуществляться на условиях обычного использования. Исключение составляет контейнер с ОЯТ из реактора КЛТ-40С, значение транспортного индекса которого превышает 10, определяющего его перевозку на условиях исключительного использования. Поэтому для перевозки таких контейнеров на условиях обычного использования требуется увеличение времени выдержки ОЯТ.

Данные табл. 4.18 позволяют оценить эффективность металлобетонной защиты контейнера ТУК-120. Так, сравнение мощности дозы на поверхности источника и на поверхности контейнера показывает степень ослабления гамма-излучения в интервале от $1,5 \cdot 10^6$ до $3,1 \cdot 10^6$, при этом эффективность защиты определяется влиянием времени выдержки ОЯТ на спектр гамма-излучения в источнике.

Таблица 4.18

Мощность дозы гамма-излучения от контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов АСММ различного типа, мЗв/ч

Нуклид	Реакторная установка							
	АБВ-38	АБВ-45	КЛТ-40С	РИТМ-200	«УниTERM-134»	«УниTERM-181»	СВБР-100	
	Продолжительность выдержки ОЯТ, лет							
	12	10	3,9	7	15	20,6	21	7
	На поверхности источника							
¹³⁷ Cs	1,96·10 ⁵	2,05·10 ⁵	2,55·10 ⁵	2,40·10 ⁵	1,44·10 ⁵	1,56·10 ⁵	1,41·10 ⁵	1,95·10 ⁵
¹³⁴ Cs	1,26·10 ⁴	2,47·10 ⁴	2,84·10 ⁵	8,58·10 ⁴	2,41·10 ³	3,56·10 ²	3,19·10 ²	3,60·10 ⁴
¹⁵⁴ Eu	1,14·10 ⁴	1,49·10 ⁴	3,02·10 ⁴	2,44·10 ⁴	7,01·10 ³	6,43·10 ³	3,73·10 ³	1,14·10 ⁴
Всего	2,20·10 ⁵	2,45·10 ⁵	5,69·10 ⁵	3,50·10 ⁵	1,53·10 ⁵	1,63·10 ⁵	1,45·10 ⁵	2,42·10 ⁵
	На поверхности контейнера							
¹³⁷ Cs	3,30·10 ⁻²	3,46·10 ⁻²	4,29·10 ⁻²	4,04·10 ⁻²	2,399·10 ⁻²	2,61·10 ⁻²	3,10·10 ⁻²	4,27·10 ⁻²
¹³⁴ Cs	9,65·10 ⁻³	1,89·10 ⁻²	0,218	6,62·10 ⁻²	0,181·10 ⁻²	3,31·10 ⁻⁴	2,50·10 ⁻⁴	2,85·10 ⁻²
¹⁵⁴ Eu	5,05·10 ⁻²	6,58·10 ⁻²	0,134	0,107	3,055·10 ⁻²	2,79·10 ⁻²	1,60·10 ⁻²	4,90·10 ⁻²
Всего	9,32·10 ⁻²	0,119	0,395	0,214	5,635·10 ⁻²	5,43·10 ⁻²	4,73·10 ⁻²	0,120
	На расстоянии 1 м от поверхности контейнера							
¹³⁷ Cs	1,46·10 ⁻²	1,53·10 ⁻²	1,90·10 ⁻²	1,79·10 ⁻²	1,06·10 ⁻²	1,15·10 ⁻²	1,35·10 ⁻²	1,86·10 ⁻²
¹³⁴ Cs	4,25·10 ⁻³	8,33·10 ⁻³	9,60·10 ⁻²	2,92·10 ⁻²	7,90·10 ⁻⁴	1,16·10 ⁻⁴	1,10·10 ⁻⁴	1,22·10 ⁻²
¹⁵⁴ Eu	2,22·10 ⁻²	2,89·10 ⁻²	5,86·10 ⁻²	4,71·10 ⁻²	1,33·10 ⁻²	1,21·10 ⁻²	6,77·10 ⁻³	2,08·10 ⁻²
Всего	4,11·10 ⁻²	5,25·10 ⁻²	0,174	9,42·10 ⁻²	2,47·10 ⁻²	2,37·10 ⁻²	2,04·10 ⁻²	5,16·10 ⁻²
	На расстоянии 2 м от поверхности контейнера							
¹³⁷ Cs	8,99·10 ⁻³	9,41·10 ⁻³	1,17·10 ⁻²	1,14·10 ⁻²	6,26·10 ⁻³	6,80·10 ⁻³	7,52·10 ⁻³	1,04·10 ⁻²
¹³⁴ Cs	2,55·10 ⁻³	5,00·10 ⁻³	5,77·10 ⁻²	1,84·10 ⁻²	4,54·10 ⁻⁴	6,66·10 ⁻⁵	5,80·10 ⁻⁵	6,56·10 ⁻³
¹⁵⁴ Eu	1,32·10 ⁻²	1,72·10 ⁻²	3,48·10 ⁻²	2,94·10 ⁻²	7,50·10 ⁻³	6,85·10 ⁻³	3,59·10 ⁻³	1,10·10 ⁻²
Всего	2,47·10 ⁻²	3,16·10 ⁻²	0,104	5,92·10 ⁻²	1,42·10 ⁻²	1,37·10 ⁻²	1,12·10 ⁻²	2,80·10 ⁻²

Этот фактор в значительной степени определяет, в частности, роль ^{134}Cs и ^{154}Eu в формировании мощности дозы на поверхности контейнера. Так, например, из данных табл. 4.12 следует, что вклад ^{154}Eu в активность источников гамма-излучения составляет примерно 1–3 % для ОЯТ различных типов РУ, тогда как вклад этого радионуклида в мощность дозы на поверхности контейнера — от 34 до 55 % (табл. 4.18). При времени выдержки ОЯТ менее 10 лет также отмечается значительный вклад ^{134}Cs в мощность дозы — от 24 % (СВБР-100) до 55 % (КЛТ-40С). Установленный факт подтверждает важность учета ^{134}Cs и ^{154}Eu в оценке дозовых характеристик и эффективности защиты контейнера ТУК-120.

В заключение можно отметить, что с точки зрения обеспечения радиационной безопасности для ОЯТ всех типов РУ АСММ допустимо двухъярусное размещение ТВС в контейнере ТУК-120, предназначенном для длительного хранения и перевозки топлива.

4.3.2. Мощность дозы от нейтронов спонтанных делений

Учет влияния нейтронного излучения на радиационную безопасность контейнерного хранилища ОЯТ требует определения плотности потока нейтронов на поверхности контейнера при известной величине источников. Нейтроны в контейнере появляются при спонтанных делениях актиноидов, основными из которых являются ^{238}Pu , ^{240}Pu и ^{244}Cm . Для перечисленных изотопов характерны наиболее длинные периоды полураспада для α -распада (определяющие их значительные количества в ОЯТ при длительном хранении) и наиболее короткие периоды спонтанных делений (табл. 4.19), определяющие высокие уровни источников нейтронов.

Таблица 4.19
Ядерно-физические характеристики спонтанно делящихся изотопов [30]

Радионуклиды	Период полураспада, лет		Выход нейтронов на одно деление
	для α -распада	спонтанных делений	
^{238}Pu	87,7	$4,75 \cdot 10^{10}$	2,28
^{240}Pu	6570	$1,14 \cdot 10^{10}$	2,28
^{244}Cm	18,1	$1,40 \cdot 10^7$	2,82

Постановка решаемой задачи может быть сформулирована следующим образом: определить пространственно энергетическое распределение плотности потока нейтронов в многозонной цилиндрической модели ТУК-120 при известной удельной объемной мощности источников в центральной зоне контейнера. Периферийные зоны образуются слоями металлобетонной защиты контейнера. На выбор методики исследования решающее влияние оказывают особенности рассматриваемого в работе эксплуатационного состояния ТУК-120.

В эксплуатационном состоянии контейнер осушен, заполнен инертным газом (азотом) и герметизирован. Стальные чехлы с ТВС, размещенные в активной части контейнера (центральная зона модели), также осушены, заполнены инертным газом (гелий или азот) и герметизированы. В случае реакторов типа СВБР пены с ТВС залиты жидким свинцом. Таким образом,

контейнер имеет значительную часть заполненного газом объема и не содержит воды — эффективного замедлителя нейтронов. Основными материалами в активной части ТУКа являются ядерное топливо (двуокись урана), матрица топливной композиции, конструкционные материалы твэлов и ТВС (сплавы на основе циркония или стали), а также стальные конструкции чехлов и ТУКа, то есть материалы, которые характеризуются низкой способностью замедлять нейтроны, поэтому нет оснований предполагать возможность накопления нейтронов низких энергий при взаимодействии быстрых нейтронов с атомами, что вызвало бы необходимость учитывать гетерогенность среды. Отмеченные особенности материального состава, характерные для эксплуатационного состояния ТУКа, позволяют при описании процессов взаимодействия с атомами рассматривать центральную зону как гомогенную однородную среду, но для которой необходимо учитывать сильное поглощение нейтронов и анизотропию процессов рассеяния.

С учетом ранее отмеченных особенностей эксплуатационного состояния ТУК-120 для оценки радиационной опасности от нейтронов спонтанных делений была разработана математическая модель переноса нейтронов в ТУК-120. При этом применены определенные ранее при решении задачи гамма-излучения данные по геометрической модели и материальному составу кольцевых цилиндрических зон ТУК-120, а также верифицированная многогрупповая программа «РИТМ», которая решает стационарное интегральное уравнение переноса нейтронов в одномерных (цилиндр, плоский слой) средах методом вероятностей пропускания [31].

Энергетическая зависимость потока нейтронов определяется с помощью метода групп. При этом вся область изменения энергии нейтронов деления (от ~12 МэВ до 0,00001 эВ) разбивается на 95 групп. Для каждой группы с номером j и зоны плотность потока нейтронов Φ_j определяется из уравнений баланса токов нейтронов через границы раздела зон:

$$J_{\text{out}} = J_{\text{in}} \cdot T + \nu QV; \quad \nu \Sigma \Phi = J_{\text{in}} \cdot \Gamma + \nu Q(1 - V), \quad (4.6)$$

где J_{in} , J_{out} — входящий в зону и выходящий из нее токи; Q и q — полный и внешний источники нейтронов в зоне с объемом ν , $Q = q + \Sigma_s \Phi$; Σ_s , Σ — макроскопические сечения и полное сечение рассеяния.

Вектор $J_{\text{in}} \cdot T$ представляет собой вклад в J_{out} от налетающих нейтронов, прошедших зону без столкновений, а νQV — вклад в J_{out} от источника внутри зоны.

Поток Φ определяется вектором $J_{\text{in}} \cdot T$ и величиной $\nu Q(1 - V)$. Под T , V и Γ понимаются вероятность прохождения нейтронов через зону, вылета из зоны и первого столкновения в зоне соответственно. Угловое распределение нейтронов, падающих на зону, учитывается разложением функции токов по ортогональным функциям.

Групповые плотности потока нейтронов Φ_j в зонах гетерогенной среды определяются посредством итерации по источнику деления (внешние итерации) и по потокам (внутренние итерации). Мощность эффективной дозы P_n от нейтронов вычисляется с помощью соотношения между дозой и плотностью потока нейтронов по формуле

$$P_n = M \sum_{j=1}^{95} A_j \Phi_j \quad (4.7)$$

где A_j — коэффициент, показывающий отношение мощности эффективной дозы для лиц из персонала к единичной плотности потока [32]; M — коэффициент умножения нейтронов.

Решение типичной задачи для условий контейнера с ОЯТ требует разбиения зон на шаги интегрирования по 0,25–0,5 см и обращения с матрицей размером 300×96.

Верификация программы «РИТМ» была выполнена на основе данных о мощности дозы нейтронов на поверхностях контейнеров ТУК-84, которые были разработаны и изготовлены для хранения и транспортировки ОЯТ реакторов АМБ Белоярской АЭС. Радиационная безопасность ТУК-84 была обоснована специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) на модельных расчетах с помощью метода Монте-Карло [24]. В этих расчетах рассматривалась модель контейнера в виде толстостенного цилиндра длиной 15,71 м с толщиной стенки 22 см (сталь 09Г2С плотностью 7,8 г/см³). Внутри контейнера размещается стальной пенал диаметром 54 см с толщиной стенки 1 см, содержащий 17 отработавших ТВС. Каждая ТВС длиной 13,5 м помещается в стальную трубу диаметром 8,9 см и толщиной 0,3 м. Активная часть (длиной 600 см) одной ТВС с топливной композицией $UO_2 + Mg$ содержит 32,4 кг урана с обогащением по ²³⁵U 3,6 %. В результате численных экспериментов, проведенных методом Монте-Карло, была определена мощность дозы на поверхности контейнера в центральной плоскости активной части ТВС: $P_n = 0,0224$ мЗв/ч [24]. Аналогичная модель, с учетом рассмотренных ранее методических приближений, была использована для расчетов дозовых характеристик поля излучения на поверхности контейнера по программе «РИТМ». Результаты этих расчетов показали следующие значения соответствующей мощности дозы: $P_n = 0,0212$ мЗв/ч.

Приведенные данные показывают, что отклонение значений P_n , полученных по программе «РИТМ», от результатов строгих расчетов по методу Монте-Карло составляет 6 %. Причинами расхождения являются: гомогенность состава источника излучения в приближенных расчетах, приближенный учет резонансного экранирования нейтронно-поперечных сечений железа и др. Вместе с тем выявленные отклонения находятся в пределах погрешностей в расчетах ослабления нейтронов, обусловленных неточностями современных данных о микроскопических сечениях взаимодействия излучения с веществом. Таким образом, сравнительные расчеты позволяют сделать вывод об эффективности программы «РИТМ», достоинством которой является высокая точность и экспрессный характер расчетов радиационных характеристик контейнеров с ОЯТ.

В соответствии с возможностями одномерной программы «РИТМ» задача определения пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и на его основе мощности эффективной дозы в контейнере ТУК-120 рассматривается в плоскости горизонтального сечения контейнера. Эта область представляется рядом кольцевых зон, каждая из которых является геометрической моделью слоев центральной (топливной) зоны и чередующихся слоев стали и бетонов биологической защиты (рис. 4.10).

Свойства зон модели ТУК-120 заданы концентрациями атомов согласно данным табл. 4.3, 4.4 и 4.13. Результаты расчетов мощности эффективной дозы на поверхности ТУК-120 с ОЯТ из РУ АСММ различного типа приведены в табл. 4.20.

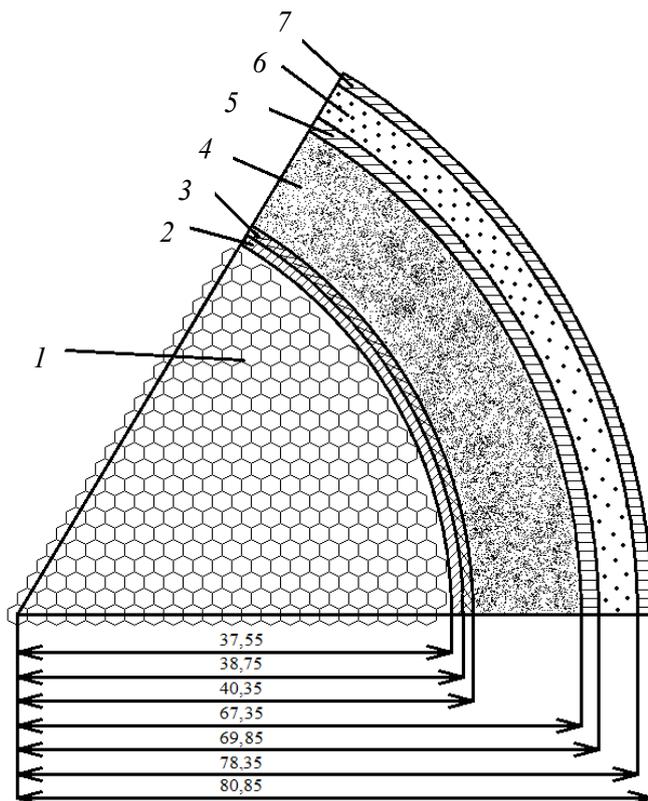


Рис. 4.10. Поперечное сечение расчетной модели контейнера ТУК-120:
 1 — топливная зона; 2 — стенка корзины; 3 — внутренняя обечайка; 4 — тяжелый бетон; 5 — промежуточная обечайка; 6 — легкий бетон; 7 — наружная обечайка

Таблица 4.20

Мощность эффективной дозы от нейтронов спонтанных делений
 на поверхности контейнера ТУК-120 с ОЯТ из различных РУ АСММ

Тип РУ (энерговыворотка, ГВт·сут)	Время выдержки ОЯТ, лет	Удельная мощность источников, нейтр/см ³ ·с	$k_{эфф}$	Мощность дозы мЗв/ч при 1 нейтр/см ³ ·с	Мощность дозы*, мЗв/ч
КЛТ-40С (137,5)	3,9	76,5	0,130	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
РИТМ-200М (291,7)	7	65,5	0,160	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$
АБВ (131,5)	10	56,6	0,134	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
	12	52,4	0,134	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$
«УниTERM» (134)	15	43,1	0,130	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$7,88 \cdot 10^{-4}$
«УниTERM» (181)	20,6	80,5	0,130	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$
СВБР-100 (631)	7	5,96	0,686	$8,92 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$
	21	5,80	0,686	$8,92 \cdot 10^{-6}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$

* С учетом умножения нейтронов.

В качестве примера, иллюстрирующего результаты расчетов, на рис. 4.11 представлено пространственное распределение мощности эффективной дозы в боковой защите контейнера ТУК-120 с топливом из РУ АБВ и СВБР-100.

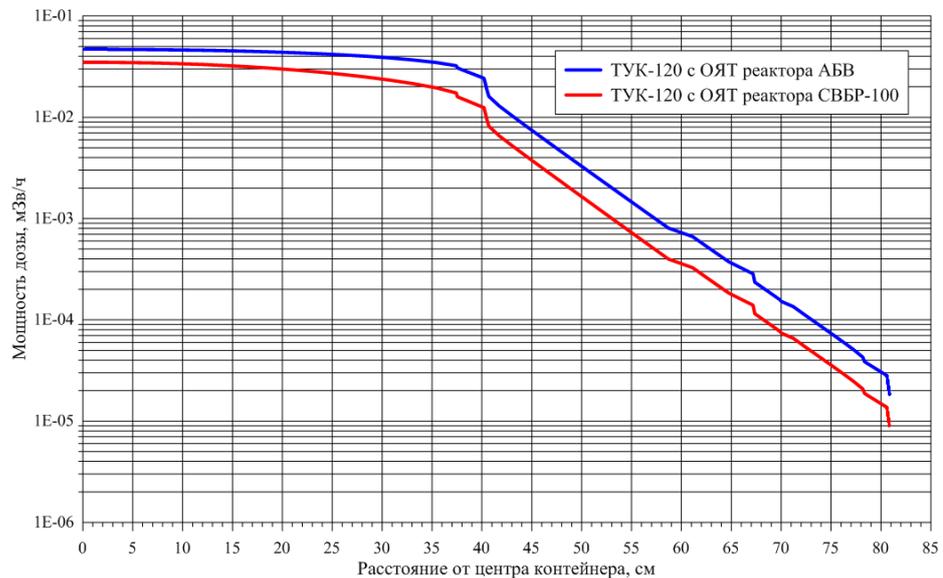


Рис. 4.11. Распределение мощности эффективной дозы от нейтронов спонтанных делений в источнике и защите контейнера ТУК-120 с топливом РУ АБВ и СВБР-100 от источника с удельной объемной интенсивностью 1 нейтр/(см³·с)

Из рис. 4.11, в частности, видно, что ослабление мощности дозы в экранах боковой защиты в обоих рассмотренных случаях характеризуется величиной $\sim 10^3$.

4.3.3. Характеристика радиационной безопасности хранилищ ОЯТ контейнерного типа, размещаемых в подземных модулях АСММ

Решение задач по ослаблению нейтронного и гамма-излучений защитными экранами контейнера ТУК-120 позволяет суммированием данных табл. 4.18 и 4.20 получить полные мощности эффективной дозы на поверхности и на расстоянии от поверхности контейнера ТУК-120 с топливом из различных РУ АСММ. Соответствующие показатели приведены в табл. 4.21.

Из табл. 4.21 следует, что значения полной мощности дозы на поверхности контейнера ТУК-120 с ОЯТ РУ АСММ различного типа варьирует в широком интервале значений — от 0,05 до 0,4 мЗв/ч.

Этот факт определяется различием в спектральном составе нейтронного излучения и во времени выдержки ОЯТ различных РУ. Так, например, при одинаковом времени выдержки мощность дозы на поверхности ТУК-120 с топливом из РУ водо-водяного типа (РИТМ-200М) примерно в 2 раза выше, чем для РУ с жидкометаллическим реактором типа СВБР-100. Максимальное значение мощности дозы (0,4 мЗв/ч) наблюдается для РУ КЛТ-40С при принятом

значении времени выдержки 3,9 года. Эта величина может быть сравнена с данными, опубликованными разработчиками контейнера ТУК-120 [33]. В частности, в этой работе сообщается, что в рамках создания контейнера ТУК-108/1 (в последующем был модернизирован в ТУК-120 для двухъярусного размещения ТВС) проведено математическое моделирование процессов образования и переноса гамма-излучения и нейтронов, учитывающее 3D-геометрию, наличие стальной арматуры в бетоне, неравномерность источников по высоте активной части ТВС. Установлено, что расчетное значение максимальной мощности эффективной дозы на поверхности контейнера с ОЯТ кораблей военно-морского флота не превышает 0,5 мЗв/ч.

Таблица 4.21

Мощность эффективной дозы от нейтронного и гамма-излучения на поверхности и на расстоянии 1 м от поверхности контейнера ТУК-120 с ОЯТ из различных РУ АСММ, мЗв/ч

РУ (энерговыработка, ГВт-сут)	Время выдержки, лет	Расстояние от поверхности контейнера, м	
		0	1
КЛТ-40С (137,5)	3,9	0,3966	0,1747
РИТМ-200М (291,7)	7	0,2155	0,09468
АБВ (131,5)	10	0,1202	0,05304
АБВ (131,5)	12	0,09431	0,04160
«УниTERM» (134)	15	0,05714	0,02505
«УниTERM» (181)	20,6	0,05577	0,02436
СВБР-100 (631)	7	0,1202	0,05168
СВБР-100 (631)	21	0,04747	0,02047

Представляет интерес соотношение вкладов в полную мощность дозы на поверхности контейнера ТУК-120 от гамма-излучения продуктов деления и нейтронов спонтанных делений актиноидов. Сравнение данных табл. 4.20 (последняя колонка) и табл. 4.21 (третья колонка) показывает, что вклад в полную мощность дозы от нейтронов не превышает 3 % (ОЯТ РУ «УниTERM» с энерговыработкой 181 ГВт-сут), а для большинства РУ составляет 1–1,5 % или менее. Таким образом, результаты выполненных исследований показывают, что мощность дозы на поверхности одиночного контейнера и в его окрестности (табл. 4.21) в основном определяется гамма-излучением продуктов деления ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{154}Eu .

Эффект хранилища в оценках радиационной безопасности проявляется в формировании поля ионизирующих излучений (нейтронного и гамма-квантов) в межконтейнерном пространстве, более интенсивного, чем на поверхности контейнера. Величина мощности дозы в месте возможного пребывания персонала около контейнера может быть определена с учетом закона ослабления ионизирующих излучений в воздухе и геометрии расположения контейнеров в хранилищах. При принятом шаге расположения контейнеров в ряду 2,35 м и расстоянии между рядами 2,7 м дистанция сотрудника из персонала

от поверхности контейнера будет равняться 1 м. Вклад в мощности дозы в этом месте будут давать только 4 соседних контейнера ячейки хранилища, показанной на рис. 4.12.

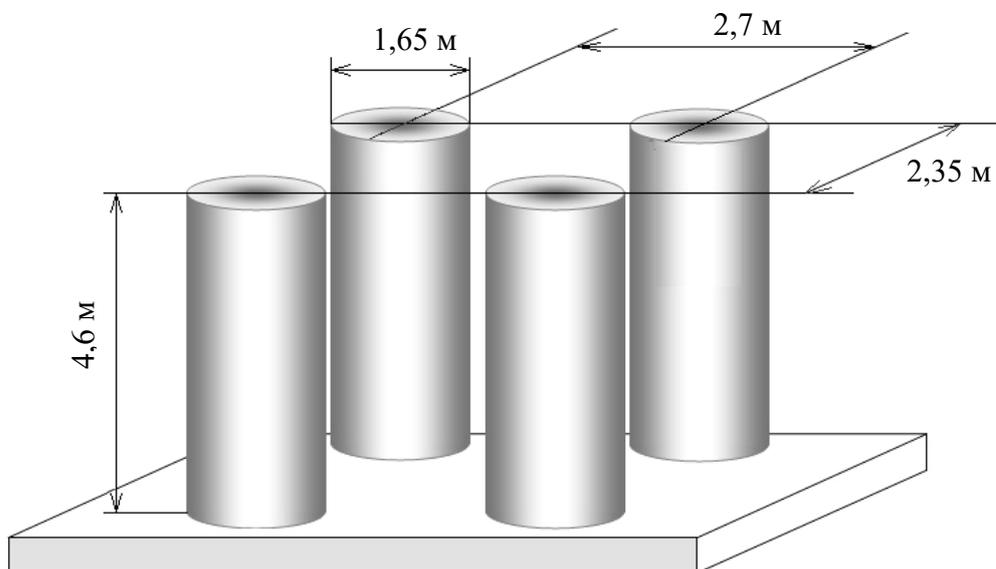


Рис. 4.12. Ячейка хранилища ОЯТ контейнерного типа

Из приведенных в табл. 4.21 результатов следует, что суммарная величина мощности дозы на расстоянии 1 м от четырех контейнеров (в центре ячейки хранилища) превышает мощность дозы на поверхности одиночного контейнера примерно в 1,72–1,76 раза и варьирует в пределах 0,08–0,7 мЗв/ч для четырех контейнеров с ОЯТ. Эти данные, которые являются основой для разработки регламента и численности персонала хранилища, следует считать приемлемым с точки зрения выполнения требований по нормативам радиационной безопасности [32].

Отметим, что в проекте контейнерного хранилища, сооруженного на площадке ФГУП «Атомфлот» для контейнеров ТУК-120 (50 контейнеров) с ОЯТ судовых РУ ледокольного флота, была оценена дозовая нагрузка на персонал хранилища. В проекте показано [20], что годовые дозы для персонала находятся в допустимых пределах при мощности дозы на поверхности контейнера ТУК-120, равной 0,7 мЗв/ч, которая существенно превышает мощность дозы на поверхности контейнеров ТУК-120 с ОЯТ РУ АСММ (см. табл. 4.21).

4.4. Оценка ядерной безопасности подземных хранилищ ОЯТ реакторов АСММ

Задача ядерной безопасности хранилища ОЯТ контейнерного типа сводится к задаче определения эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}$ в среде одного контейнера, что объясняется низкой утечкой

нейтронов (на уровне $< 1 \%$) из контейнера ТУК-120, имеющего в составе защитных экранов бетон и сталь — материалы, эффективно замедляющие и поглощающие нейтроны, практически исключают взаимодействие (взаимовлияние) контейнеров хранилища.

Нормативным требованием обеспечения ядерной безопасности является условие, при котором величина $k_{эфф}$ не превышает значение 0,95. Различают два состояния контейнера и соответственно два сценария в оценках безопасности (сценарий нормальной эксплуатации и аварийный). В качестве аварийного сценария, как правило, рассматривают разгерметизацию контейнера и чехлов с обводнением внутренних заполненных инертным газом полостей и пустот.

Первый сценарий практически изучен при решении «нейтронной» задачи радиационной безопасности с помощью программы «РИТМ», изложенном в предыдущем разделе. Кроме $k_{эфф}$ и пространственно-энергетического распределения нейтронов, в алгоритме программы «РИТМ» предусмотрена возможность определения интегральных параметров переноса нейтронов, характеризующих контейнер ТУК-120 как размножающую нейтроны «реакторную» систему: вероятность избежать поглощения при замедлении ϕ , квадрат длины миграции M^2 . Эти параметры, приведенные в табл. 4.22, вместе со значениями $k_{эфф}$ позволяют понять суть различий в размножающих свойствах среды контейнера ТУК-120 для разных видов ядерного топлива: $UO_2 + Zr$ («УниTERM»), $UO_2 +$ силумин (АБВ и РИТМ-200М), UO_2 (СВБР-100).

Таблица 4.22

Параметры размножения нейтронов
для эксплуатационного (сухого) состояния контейнера ТУК-120
с топливом из различных РУ АСММ (программа «РИТМ»)

Тип топлива	Тип РУ			
	«УниTERM»	АБВ	РИТМ-200М	СВБР-100
Масса делящихся изотопов в ТУК-120 $^{235}U/^{239}Pu$				
Свежее топливо	82,4	80	118	348
ОЯТ	28,5/3,3	30,5/3,4	51,3/6,1	216/76
Эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эфф}$				
Свежее топливо	0,2303	0,2363	0,2373	0,6860
ОЯТ	0,1296	0,1336	0,1597	0,6527
Квадрат длины миграции $M^2, см^2$				
Свежее топливо	510	565	589	244
ОЯТ	531	586	610	258
Вероятность избежать поглощения при замедлении, ϕ				
Свежее топливо	0,5274	0,5469	0,5501	0,3148
ОЯТ	0,5514	0,5677	0,5705	0,3309

Из данных табл. 4.22, в частности, видно, что высокие значения $k_{эфф}$ (0,66–0,69) для сухого состояния ТУК-120 с топливом из РУ СВБР объясняются не только высоким содержанием ^{235}U и ^{239}Pu , но и существенно меньшей утечкой нейтронов из топливной зоны контейнера. Квадрат длины миграции M^2 , определяющий утечки нейтронов из топливной зоны, для случая с топливом РУ СВБР равен примерно 240–260 $см^2$, а соответствующее значение для топлива

из водо-водяных реакторов — 510–610 см². Кроме того, топливная зона контейнера с топливом из РУ СВБР-100 имеет более низкое значение вероятности избежать поглощения при замедлении ϕ (0,32–0,33) по сравнению с топливом водо-водяных реакторов (0,53–0,57).

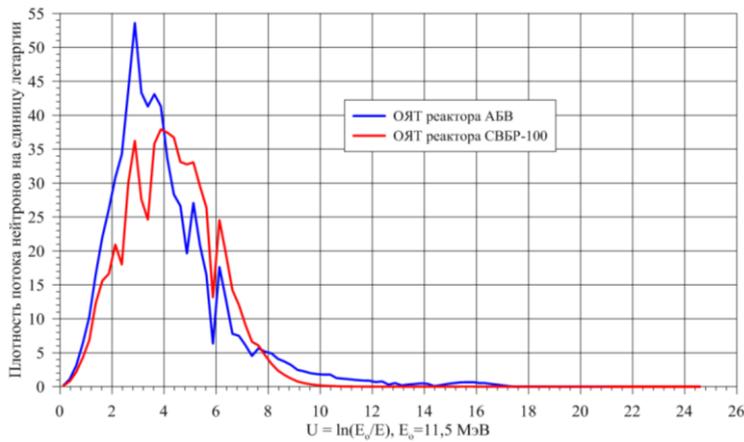
Из представленных в табл. 4.22 результатов видно, что в сухом состоянии максимальное значение $k_{эфф}$ относится к вариантам со свежим топливом. Для контейнеров с топливом из реакторов водо-водяного типа значения $k_{эфф}$ варьируют в узком интервале 0,230–0,237, а для контейнера с топливом из реактора СВБР-100 наблюдается самое высокое значение $k_{эфф}$, равное 0,686. Таким образом, эти результаты свидетельствуют о том, что в сухом состоянии хранилища с топливом РУ АСММ ядерная безопасность обеспечивается даже в случае загрузки контейнеров свежим топливом.

Аварийный сценарий постулируется как обводнение контейнера. Следует рассматривать две ситуации: первая, когда обводнение происходит вследствие разгерметизации крышки контейнера и вода заполняет газовые полости вокруг чехлов; вторая может реализоваться при разгерметизации как крышки контейнера, так и крышек чехлов. В этом случае вода заполняет все газовые полости в контейнере.

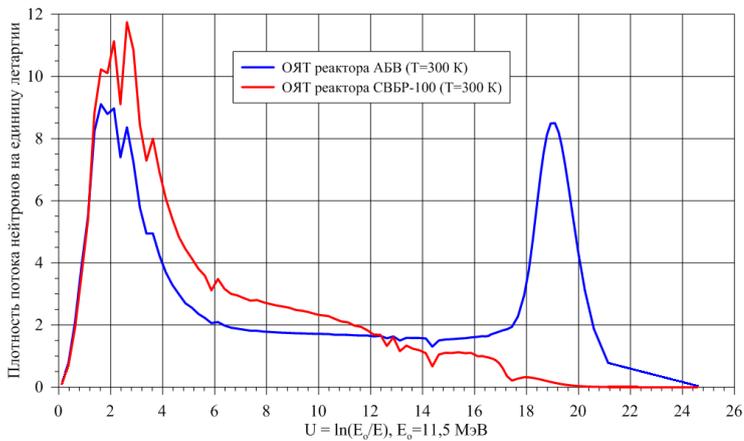
Разгерметизация контейнера и залив его водой приводят к росту эффективного коэффициента размножения нейтронов, что объясняется высокой замедляющей способностью молекул воды, снижающей как поглощение, так и пробег нейтронов (следовательно, утечку нейтронов) в процессах рассеяния и замедления быстрых нейтронов деления в среде источника. Кроме того, присутствие воды в контейнере видоизменяет спектр плотности потока нейтронов, смещая его в область низких энергий. Иллюстрирует сказанное картина спектров плотности потока нейтронов в центре контейнера ТУК-120 с топливом РУ АБВ и СВБР-100, установленная с помощью программы «РИТМ» (в гомогенном приближении) для сухого (рис. 4.13, а) и обводненного состояний (рис. 4.13, б).

Из-за применения метода гомогенизации эти результаты имеют приближенный характер, но верно дают картину накопления нейтронов тепловых и резонансных энергий в обводненном контейнере и являются убедительным аргументом о необходимости учета гетерогенных эффектов, существенных в тепловой и резонансной частях спектра нейтронов при расчете $k_{эфф}$. Эффективная методология учета гетерогенных эффектов, основанная на теории альbedo, содержится в алгоритме математической программы «КРАТЕР», представленной в разделе 4.2 и использованной при расчете изотопного состава ОЯТ реакторов АСММ. Эта программа была применена при изучении вопроса критичности обводненных контейнеров ТУК-120.

На основе ПК «КРАТЕР» были разработаны математические модели нейтронно-физических процессов в обводненных контейнерах и проведены расчеты параметров размножения нейтронов ($k_{эфф}$, k_{∞} , M^2) контейнеров ТУК-120 с топливом из различного типа РУ АСММ. При этом была применена одномерная цилиндрическая геометрия, аналогичная использованной в исследованиях нейтронно-физических параметров контейнеров ТУК-120 в сухом эксплуатационном состоянии с помощью программы «РИТМ», за исключением центральной топливосодержащей зоны, геометрия и материальный состав которой заданы с помощью модели одномерной многозонной реакторной ячейки.



a



б

Рис. 4.13. Распределение плотности потока нейтронов в центре контейнера ТУК-120 в зависимости от логарифма при интенсивности источника нейтронов $1 \text{ нейтр/см}^3 \cdot \text{с}$ (программа «РИТМ»):
a — сухое состояние; *б* — обводненное состояние

С учетом сложности геометрии центральной области контейнера было рассмотрено несколько вариантов реакторной ячейки. Так, для ТУК-120 с топливом из РУ «Униатерм» применена модель четырнадцатизонной реакторной ячейки с топливной зоной, заданной размерами и материальным составом ТВС. Последующими зонами заданы циркониевая труба ТВС, стальная труба для размещения ТВС, конструкционные материалы чехла, заполненные водой зазоры, а также дистанционирующие решетки и межчехловая вода. Для вариантов ТУК-120 с топливом РУ АБВ, РИТМ-200М и СВБР применена более простая четырехзонная реакторная ячейка с центральной зоной, которая представляется гомогенным составом и размерами трех или одной ТВС, а последующие зоны — конструкционные материалы пеналов и чехлов, а также межчехловая вода и дистанционирующие решетки.

Консервативная концепция ядерной безопасности рассматривается в том случае, когда ОЯТ задается составом свежего ядерного топлива.

Основные результаты, полученные для обоих рассмотренных сценариев разгерметизации контейнера ТУК-120, сведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23

Эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эфф}$ для аварийного сценария обводнения контейнера ТУК-120 с топливом из различных РУ АСММ (программа «КРАТЕР»)

Характеристика топлива и аварийного сценария	Тип РУ (энерговыработка, ГВт·сут)			
	СВБР-100 (631)	«УниTERM» (181)	АБВ (131,5)	РИТМ-200М (291,7)
Характеристика загрузки топлива в контейнере				
Масса ^{235}U , кг	348	82,4	79,8	118
Обогащение урана по изотопу ^{235}U , %	16,5	19,75	16,5	17,5
$k_{эфф}$ для сценариев обводнения контейнера ТУК-120				
Разгерметизация крышки контейнера	0,863	0,775	0,630	0,645
Разгерметизация контейнера и чехлов	–	0,847	0,785	0,797

В качестве параметров в таблице показаны загрузка ^{235}U в контейнере и обогащение урана по изотопу ^{235}U . Как видно из табл. 4.23, при разгерметизации только крышки контейнера и обводнении межчехлового объема (чехлы сухие) $k_{эфф}$ не превышает значения 0,863 (топливо из РУ СВБР), а для сценария разгерметизации крышек контейнера и чехлов, то есть полного обводнения контейнера, $k_{эфф}$ не превышает значения 0,847 (топливо из РУ «УниTERM»). Обе приведенные величины $k_{эфф}$ не превышают значения 0,95, что позволяет говорить о ядерной безопасности в аварийном сценарии.

В табл. 4.24 приведена информация о коэффициентах размножения для бесконечной среды k_{∞} и квадрате длины миграции нейтронов M^2 для всех рассмотренных состояний обводненного контейнера ТУК-120.

Эта информация позволяет понять причины различия в $k_{эфф}$ для различных типов топлива и разных условий обводнения контейнера ТУК-120, а также оценить уровень ядерной безопасности хранилищ контейнеров ТУК-120 с топливом из различных РУ АСММ. В частности, из данных табл. 4.24 видно, что k_{∞} контейнеров с топливом из реакторов водо-водяного типа не превышает значения 1,0, что означает доказательность обеспечения ядерной безопасности хранилищ контейнеров с ОЯТ РУ АБВ, РИТМ-200 и «УниTERM» в более консервативном приближении.

На рис. 4.14 представлено рассчитанное по альбедной методике с помощью программы «КРАТЕР» пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов в трехзонной реакторной ячейке для модели ТУК-120 с топливом из РУ АБВ. Рисунок демонстрирует характер неравномерности поля нейтронов различных энергий, в частности, из него видно, что плотность потока нейтронов высоких энергий ($E > 1$ кэВ) в топливной зоне ячейки (расстояние

около 11 см) примерно в 3 раза выше, чем в зоне воды. При этом плотность потока нейтронов тепловых энергий ($E < 0,5$ эВ) в зоне воды примерно в 5 раз выше, чем в зоне топлива.

Таблица 4.24

Нейтронно-физические параметры k_{∞}/M^2 для обводненного состояния контейнера ТУК-120 с топливом из различных РУ (программа «КРАТЕР»)

Тип сценария	Тип РУ			
	СВБР-100	«УниTERM»	АБВ	РИТМ-200М
Разгерметизация крышки контейнера	1,025/68	0,960/98	0,823/146	0,837/145
Разгерметизация крышки контейнера и чехлов	–	0,746/38	0,889/47	0,899/47

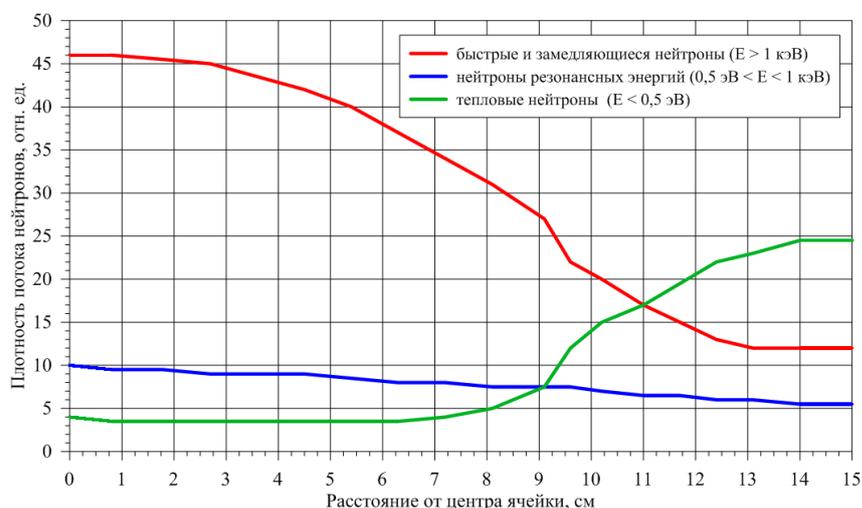


Рис. 4.14. Пространственно-энергетическое распределение плотности потока нейтронов в цилиндрической реакторной ячейке контейнера ТУК-120 с топливом из РУ АБВ (программа «КРАТЕР»)

Эти различия оказывают сильное влияние на баланс нейтронов в реакторной ячейке и учитываются при расчете $k_{\text{эфф}}$ контейнеров ТУК-120 с топливом из различных РУ АСММ. Для рассмотренных компоновок контейнера ТУК-120 тепловыделяющими сборками из реакторов водо-водяного типа («УниTERM», АБВ, РИТМ-200) и охлаждаемых эвтектикой Рb-Vi (СВБР-100) с помощью методов математического моделирования нейтронно-физических процессов в контейнере ТУК-120 показана ядерная безопасность контейнеров как в условиях нормальной эксплуатации (сухое состояние), так и при авариях, связанных с обводнением контейнера и чехлов.

По результатам исследований определено, что ядерно безопасным компоновкам соответствует следующее количество контейнеров, необходимых для размещения ТВС одной активной зоны:

- РИТМ-200М — 5;
- «УниTERM» — 4;
- АБВ — 3;
- СВБР-100 — 5;
- СВБР-10 — 2.

Таким образом, методами компьютерного моделирования авторами была изучена ядерная безопасность контейнеров ТУК-120 как мини-хранилищ ОЯТ из реакторных установок водо-водяного типа и жидкометаллических реакторов АСММ и предложены ядерно безопасные компоновки топлива в контейнере.

4.5. Оценка тепловой безопасности подземных хранилищ ОЯТ реакторов АСММ

Ранее были представлены результаты изучения вопросов обеспечения ядерной и радиационной безопасности подземных хранилищ контейнерного типа ОЯТ РУ АСММ различного типа. При этом в выполненных исследованиях установлены параметры, необходимые для определения исходных данных для рассмотрения задачи о тепловом состоянии подземных хранилищ ОЯТ. Так, в оценках ядерной безопасности установлены ядерно безопасные компоновки ТУК-120 тепловыделяющими сборками, которые позволяют определить интенсивность источников тепла в контейнерах. В исследованиях радиационной безопасности хранилищ ОЯТ подтверждены радиационно безопасные для персонала расстояния между контейнерами, которые дают возможность, в частности, оценить условия теплообмена на поверхности контейнеров ТУК-120.

Как отмечалось ранее, в настоящей работе принят тип сухого хранения ОЯТ в контейнерах ТУК-120. Для сухого хранилища ОЯТ, наряду с общими требованиями ко всем типам хранилищ ОЯТ, предъявляется требование обеспечения безопасного температурного режима хранения топлива: температура оболочек ТВЭЛов и температура поверхности контейнеров не должна превышать предельно допустимые значения температуры в среде хранения в течение всего срока эксплуатации. Согласно нормативным требованиям, в условиях нормальной эксплуатации температура оболочек ТВЭЛов реакторов водо-водяного типа не должна превышать 350 °С, а ТВЭЛ реакторов, охлаждаемых свинцово-висмутовой эвтектикой, — 430 °С [21, 34]. При этом температура на любой легкодоступной наружной поверхности контейнера не должна превышать 85 °С. Поэтому главной задачей в определении тепловой безопасности хранилища ОЯТ РУ АСММ следует считать оценку максимальных температур ТВС и поверхности контейнера ТУК-120 с топливом из активных зон различных РУ.

Одним из ключевых вопросов в этой задаче является определение мощности остаточного энерговыделения, которая развивается после окончания кампании реактора за счет радиоактивного распада продуктов деления и актиноидов в составе облученного топлива.

4.5.1. Остаточные тепловыделения в ОЯТ реакторов АСММ

Суммарное остаточное энерговыделение продуктов деления ОЯТ, выделяемое после останова реактора, является фундаментальным фактором безопасности. Для его определения в США разработан стандарт ANSI/ANS-5.1-1979 [35]. В этом стандарте обобщены результаты моделирования цепочек распада продуктов деления, параметры которых были установлены экспериментально. Данная компиляция объединяет группы цепочек с примерно одинаковыми периодами распада и описывает выход энергии за счет продуктов деления ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu в виде суммы экспонент для больших времен выдержки ОЯТ до 30 лет. Мощность остаточного тепловыделения определяется величиной эксплуатационной мощности реактора, продолжительностью работы реактора и временем, прошедшим после окончания эксплуатации (время выдержки).

Применение стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 для расчета мощности тепловыделения в ОЯТ реальных АСММ является естественным, так как для этих реакторов характерны большие сроки эксплуатации и время выдержки топлива. Однако методика стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 имеет существенные недостатки. Она не учитывает вклада в остаточное энерговыделение α -распада актиноидов, а также приближенно описывает образование долгоживущих продуктов деления. Поэтому была предпринята попытка проверить эффективность стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 на примере сопоставления данных по остаточному тепловыделению в ОЯТ реактора ВВЭР-1000, получаемому независимыми методами: ANSI/ANS-5.1-1979 и программа AFPA [1]. Программа AFPA детально учитывает накопление продуктов деления и актиноидов в реакторе ВВЭР-1000 с учетом спектра нейтронов в реакторе и его изменения в процессе топливного цикла. Она также учитывает изменение изотопного состава топлива и, таким образом, является более строгой методологией, нежели стандарт ANSI/ANS-5.1-1979.

Результаты сравнения представлены на рис. 4.15, на котором приведена зависимость МОЭ смеси продуктов деления и актиноидов, нормированной на среднюю мощность реактора. Сплошной линией изображены значения остаточного тепловыделения, рассчитанные по стандарту ANSI/ANS-5.1-1979, и точками — данные из Справочника [1], относящиеся к режиму эксплуатации с трехгодичной кампанией и средней тепловой мощностью 2588 МВт. Показаны данные как с учетом, так и без учета α -распада. Из рис. 4.15 видно удовлетворительное согласие двух независимых методик для случая, когда не учитывается вклад α -распада в рассчитанные по программе AFPA значения остаточного тепловыделения. Различия для области высоких времен выдержки составляют 3–4 %. Рис. 4.15 позволяет также видеть значительные погрешности прогнозирования остаточных тепловыделений по стандарту ANSI/ANS-5.1-1979 в диапазоне 8–33 %, если дополнительно не учитывается вклад альфа-распада для выдержки от 10 до 30 лет. Приведенные данные обуславливают очевидную рекомендацию по расчету остаточных тепловыделений в ОЯТ РУ АСММ с помощью стандарта ANSI/ANS-5.1-1979 с учетом поправки на α -распад актиноидов.

Результаты расчета по стандарту ANSI/ANS-5.1-1979 остаточных тепловыделений, развивающихся в активных зонах РУ АСММ, приведены в табл. 4.26 для времени выдержки от 1 до 30 лет. Значения эксплуатационной мощности были определены на основе данных по энерговыработке и продолжительности топливного цикла активных зон РУ АСММ (см. табл. 4.1).

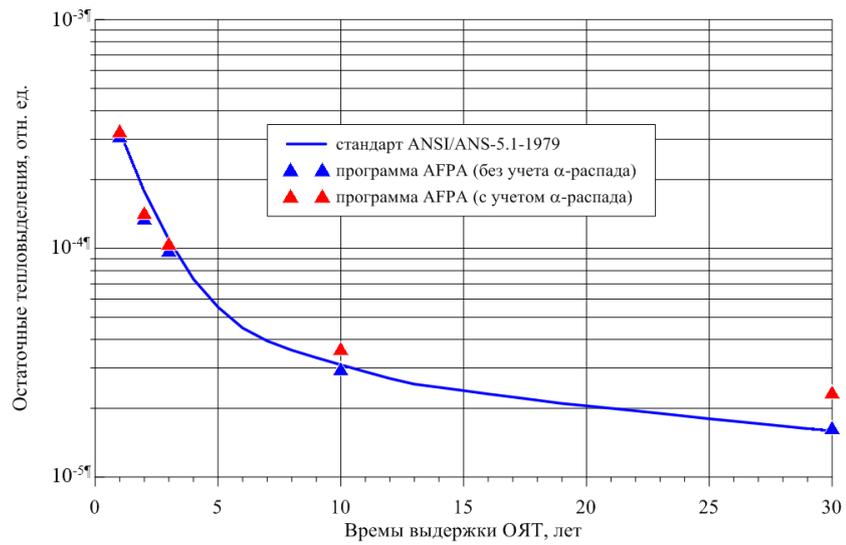


Рис. 4.15. Зависимость остаточных тепловыделений смеси продуктов деления и актиноидов в ОЯТ реактора ВВЭР-1000 при средней мощности 2,59 ГВт и времени эксплуатации 3 года

Таблица 4.26

Мощность остаточного энерговыделения ОЯТ активных зон реакторов АСММ, Вт (стандарт ANSI/ANS-5.1-1979)

Время выдержки, лет	Тип РУ АСММ				
	АБВ	«УниTERM»	СВБР-100	СВБР-10	РИТМ-200М
	Энерговыработка, ГВт·сут				
	131,5	181	631	231	291,7
1	14140	13410	111400	18760	46155
2	9617	9971	67620	13860	28687
3	7360	8176	46580	11310	20232
4	5945	6917	34700	9543	15368
5	5090	6080	28230	8375	12664
6	4443	5383	23950	7408	10823
7	4048	4943	21500	6799	9754
8	3774	4626	19890	6362	9038
9	3532	4340	18530	5967	8431
10	3310	4073	17320	5600	7885
12	2905	3583	15160	4923	6907
15	2579	3184	13440	4376	6530
20	2217	2740	11530	3766	5258
22	2107	2604	10950	3579	4994
24	2002	2475	10410	3401	4745
26	1903	2353	9892	3234	4511
28	1811	2240	9413	3078	4292
30	1724	2132	8958	2930	4085

Дополнительный вклад в остаточное тепловыделение от α -распада для активных зон реакторов АСММ рассчитывался по данным изотопного массового состава ОЯТ этих реакторов, представленный в табл. 4.3 и 4.4. Принимался во внимание α -распад радионуклидов, которые вносят доминирующий вклад в остаточное тепловыделение ОЯТ (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm), что определяется массовым содержанием актиноидов в облученном топливе и периодом их полураспада.

Оценка тепловыделения выполнялась по соотношению

$$n_{\alpha} = (a_0/b_0) \cdot m \cdot E_{\alpha} \cdot \exp(-\tau \ln 2/T_{1/2}), \quad (4.8)$$

где n_{α} — мощность тепловыделения, Вт; E_{α} — энергия α -частиц, МэВ/распад; m — масса радионуклида в активной зоне на момент окончания кампании; $T_{1/2}$ — период полураспада, лет; a_0 — удельная активность радионуклида, Бк/кг; τ — время выдержки, лет; b_0 — коэффициент размерностей, равный $6,242 \cdot 10^{12}$ МэВ/(с·Вт).

Принятые значения ядерно-физических констант приведены в табл. 4.27.

Таблица 4.27

Ядерно-физические константы актиноидов в активных зонах РУ АСММ, принятые в расчетах остаточного тепловыделения за счет α -распада

Нуклид	$T_{1/2}$, лет	E_{α} , МэВ/распад	a_0 , ТБк/кг
^{238}Pu	87,7	5,59	633
^{239}Pu	24100	5,11	2,3
^{240}Pu	6570	5,26	8,43
^{241}Am	432	5,64	127
^{244}Cm	18,1	5,87	2990

Результаты расчетов остаточного тепловыделения от α -распада актиноидов приведены в табл. 4.28. В этой же таблице показаны значения МОЭ, которые рассчитаны по стандарту ANSI/ANS-5.1-1979 (см. табл. 4.26) и соотносятся с процессами β - и γ -распада продуктов деления. Величины остаточного тепловыделения за счет продуктов деления были определены выборкой из табл. 4.26 по значениям принятых времен выдержки для каждого типа РУ АСММ. Суммирование величин остаточного тепловыделения от распада актиноидов и продуктов деления дает полные энерговыделения в ОЯТ активных зон РУ АСММ, которые также показаны в табл. 4.28.

Мощность остаточного энерговыделения в контейнере ТУК-120 зависит от количества размещенных в нем ТВС и численно может быть определена по соотношению между числом ТВС в контейнере и в активной зоне (коэффициент загрузки ТУК-120). Как видно из табл. 4.28, величина МОЭ в контейнере ТУК-120 с топливом из различных РУ АСММ варьирует в широком интервале значений от 900 до 2900 Вт. Наибольшее значение МОЭ, которое относится к реактору СВБР-100, объясняется наиболее высокой энерговыработкой активной зоны из рассмотренных типов реакторов АСММ.

Величина МОЭ в упаковках с топливом определяет интенсивность источников тепла в хранилище ОЯТ контейнерного типа и оказывает основное влияние на процессы гидродинамики и теплообмена в помещении хранилища

для ОЯТ реакторов различного типа. В качестве первого этапа исследования этих процессов в работе рассмотрена задача по оценке особенностей формирования температурного режима контейнера в условиях свободно-конвективного теплообмена на его боковой поверхности.

Таблица 4.28

Остаточные тепловыделения ОЯТ активных зон и в контейнерах ТУК-120 с ОЯТ из различных РУ АСММ после выдержки в течение времени, равного продолжительности топливного цикла

Мощность остаточного энергоснабжения	Тип РУ				
	«Униформ»	АБВ	РИТМ-200М	СВБР-10	СВБР-100
	Время выдержки, лет				
	20,6	12	7	19	21
МОЭ в АЗ, Вт, в том числе	3533	3427	11004	4271	12412
продукты деления (ANSI/ANS-5.1-1979)	2700	2905	9754	3864	11240
актиноиды (α -распад)	833	522	1250	407	1172
МОЭ в ТУК-120, Вт	933	1190	2323	2215	2849

4.5.2. Температурный режим контейнеров ТУК-120

Температуры материалов контейнера ТУК-120 могут быть определены из решения нестационарной задачи о разогреве контейнера после загрузки его тепловыделяющими сборками. Решение этой задачи требует изучения теплообмена между контейнером и окружающей его средой (воздух) на внешних границах контейнера. Граничный теплообмен является сложной функцией гидродинамики течения воздуха, формирующегося при разогреве контейнера, а также воздухообмена между хранилищем и окружающей средой.

Следует отметить, что известно ограниченное число исследований по изучению теплового режима хранилищ ОЯТ контейнерного типа. Так, например, в работе японских авторов [36] рассмотрены экспериментально-теоретические исследования, в которых детально изучена теплогидравлика в хранилище контейнерного типа, а также теплообмен контейнеров с ОЯТ диаметром 2,5 м и высотой 5,5 м с воздухом в помещении хранилища. При расстоянии между рядами контейнеров 1,5 м относительный шаг размещения контейнеров по квадратной решетке (отношение шага размещения контейнеров к их диаметру) составляет 1,6.

В экспериментах по изучению теплообмена на модели 1:5, схематичное представление которой приведено на рис. 4.16, были смоделированы два вида потока воздуха в области хранения контейнеров, которые способствуют отводу тепловыделений: один поток, направленный вверх, который обусловлен силами плавучести на поверхности контейнеров, другой — горизонтальный, индуцированный эффектом стека (эффект дымовой трубы). Эти два потока способствуют охлаждению контейнеров.

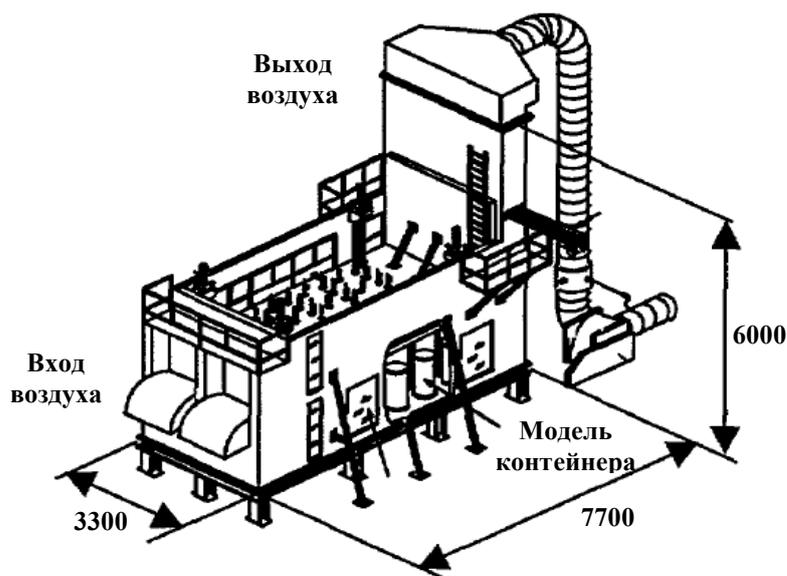


Рис. 4.16. Экспериментальная модель хранилища контейнерного типа [36]

По результатам экспериментальных исследований было определено, в частности, увеличение теплоотдачи за счет вынужденной конвекции, которая обусловлена действием выталкивающей силы из выхлопной трубы только для части контейнеров, расположенных наиболее близко ко входу воздуха. Для контейнеров дальних рядов, где наблюдаются застойные зоны, теплообмен осуществляется за счет свободной конвекции. Кроме того, было установлено слабое влияние высоты камеры хранения на теплообмен контейнеров. Вместе с тем высота камеры оказывает существенное влияние на температуру воздуха внутри камеры. Прогнозные расчеты авторов работы [36] для проектных условий хранения (температура на входе $29,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на выходе $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) показали, что при высоте камеры хранения, превышающей высоту контейнеров примерно в 2,4 раза, может быть обеспечен безопасный тепловой режим контейнеров с реальным тепловыделением 20 кВт в каждом контейнере.

Обсуждая результаты рассмотренных экспериментальных исследований, можно отметить, что для рассматриваемой компоновки контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ относительный шаг эффективной квадратной решетки размещения контейнеров составляет 1,56, то есть практически соответствует компоновке контейнерного хранилища, которое рассматривается в работе [36]. При этом величина остаточного тепловыделения в одном контейнере, исследуемого в этой работе, примерно в 7 раз превышает тепловыделение в наиболее энергонапряженном контейнере ТУК-120 с ОЯТ реактора СВБР-100. Указанные относительные параметры позволяют сделать предварительный вывод о том, что при реализации схемы движения воздуха, аналогичной той, которая рассмотрена в работе [36], может быть обеспечен безопасный тепловой режим хранилища для контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ.

Для оценки эффективности свободно-конвективного теплообмена в процессе отвода тепла применительно к контейнерному хранилищу ОЯТ были выполнены расчетные исследования в модели одиночного контейнера с помощью математической программы FFM, разработанной в Горном институте КНЦ РАН. Эта программа позволяет реализовать численное решение уравнения нестационарной теплопроводности в трехмерной постановке. В схематическом виде модель контейнера ТУК-120, которая использована в теплофизических расчетах, представлена на рис. 4.17.

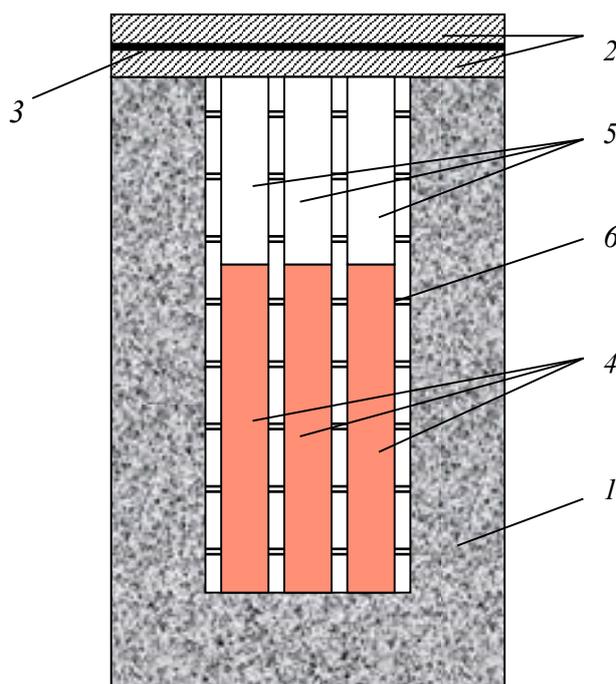


Рис. 4.17. Схематический вид модели контейнера ТУК-120:
 1 — корпус контейнера; 2 — стальные крышки; 3 — прокладка; 4 — зона чехлов с ОТВС; 5 — зона чехлов без ОТВС; 6 — стальные диафрагмы

Эти расчеты проводились на основе модельного представления, в соответствии с которым контейнер установлен на основании горной выработки, моделируемом слоем гранита толщиной 50 м с граничным условием первого рода (начальная температура породы 7 °С) на его нижней поверхности.

Необходимо отметить, что одной из ограничительных особенностей алгоритма программы FFM является модельное представление контейнера цилиндрической формы в виде параллелепипеда. Основные методические подходы для учета изменения геометрических параметров, которые оказывают наиболее значительное влияние на формирование теплового состояния контейнера, достаточно подробно рассмотрены в более ранней работе авторов [25]. В этой же работе представлены элементы алгоритма программы FFM для расчета кондуктивного и радиационного теплообмена во внутрикорпусном пространстве, а также теплообмена излучением между поверхностью контейнера и поверхностью подземного хранилища ОЯТ. В соответствии с этим алгоритмом исходные

данные по теплофизическим свойствам отдельных зон модели формировались на основе материального состава и конструктивных параметров ТВС (см. раздел 4.1) и контейнера ТУК-120.

На первом этапе исследований свободно-конвективного теплообмена на боковой поверхности контейнера была выполнена оценка коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах движения охлаждающей среды (воздуха). Целевым назначением этой задачи являлась оценка протяженности зоны ламинарного режима по высоте контейнера в виде вертикальной плоской поверхности и определение средней по высоте величины коэффициента теплоотдачи при постоянной плотности теплового потока. При этом принято допущение, что воздух поступает в пространство между контейнерами снизу при равномерном распределении по всей площади хранения с постоянной температурой.

Для оценки локального числа Нуссельта для ламинарного режима было использовано выражение следующего вида [37]:

$$\text{Nu}_x = F_2(\text{Pr}) \cdot (\text{Gr}_x^* \cdot \text{Pr})^{1/5} \quad (4.9)$$

В этом выражении модифицированное число Грасгофа Gr_x^* определяется следующей корреляционной зависимостью:

$$\text{Gr}_x^* = g \cdot \beta \cdot q \cdot x^4 / (\lambda \nu^2), \quad (4.10)$$

где g — ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; β — коэффициент объемного расширения воздуха, $1/\text{К}$; x — координата по высоте контейнера, м ; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ν — кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

Величина плотности теплового потока q ($\text{Вт}/\text{м}^2$) определялась при консервативном допущении о распределении мощности остаточного тепловыделения по площади боковой поверхности модели контейнера.

Для $F_2(\text{Pr})$ на основе анализа экспериментальных данных в работе [37] предложено следующее соотношение:

$$F_2(\text{Pr}) = [\text{Pr}/(4 + 9\text{Pr}^{1/2} + 10\text{Pr})]^{1/5}. \quad (4.11)$$

Локальное значение коэффициента теплоотдачи α_x на боковой поверхности контейнера определяется из выражения:

$$\alpha_x = \text{Nu}_x \cdot \lambda / x \quad (4.12)$$

В работе [37] отмечается, что, поскольку при турбулентном движении число Nu пропорционально $\text{Ra}^{1/3}$, температура стенки при однородном обогреве является постоянной и число Нуссельта при турбулентном движении может быть определено по следующей аппроксимации:

$$\text{Nu} = 0,15(\text{Ra} \cdot \Phi(\text{Pr}))^{1/3}, \quad (4.13)$$

где Ra — число Рэлея, $\text{Ra} = g \cdot \beta \cdot H_k^3 \cdot (t_w - t_o) / (\nu a)$; H_k — высота контейнера, м ; t_w — средняя температура на поверхности контейнера; t_o — температура воздуха вне пограничного слоя; a — температуропроводность воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

В формуле (4.13) $\Phi(\text{Pr})$ определяется по следующему уравнению:

$$\Phi(\text{Pr}) = [1 + (0,437/\text{Pr})^{9/16}]^{-16/9}. \quad (4.14)$$

Коэффициенты теплоотдачи определялись в итерационном цикле по избыточной температуре на поверхности контейнера ($t_w - t_0$) при достижении определенного относительного отклонения (0,1 %) расчетной величины q от заданной плотности теплового потока. В табл. 4.29 представлены расчетные данные по среднему коэффициенту теплоотдачи на участке ламинарного движения, величине коэффициента теплоотдачи при турбулентном движении и среднему значению коэффициента теплоотдачи по высоте контейнера с учетом длины участка с ламинарным режимом. Как видно из данных табл. 4.29, для наиболее энергонапряженных контейнеров с ОЯТ реакторов РИТМ-200М и СВБР-100 характерны незначительные различия между величиной коэффициента теплоотдачи в области турбулентной свободной конвекции и среднего по высоте контейнера (в пределах 0,5 %). При этом область ламинарного движения распространяется практически только в пределах днища контейнера, толщина которого в модельном представлении контейнера составляет 0,42 м.

Таблица 4.29

Оценка коэффициента теплоотдачи на боковой поверхности контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов различного типа

Тип реактора	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)		
	средний в области ламинарной свободной конвекции	в области турбулентной свободной конвекции	средний по высоте контейнера
АБВ	3,15 (0,648 м*)	3,40	3,36
«УниTERM»	2,89 (0,648 м)	3,07	3,04
РИТМ-200М	3,65 (0,432 м)	3,79	3,78
СВБР-10	3,45 (0,648 м)	3,76	3,71
СВБР-100	3,83 (0,432 м)	4,01	3,99

* Расчетная протяженность (высота) участка ламинарной свободной конвекции.

В расчетах теплового состояния контейнера в трехмерной постановке в алгоритме программы FFM была использована критериальная зависимость для турбулентного режима движения. Величина коэффициента теплоотдачи определялась в итерационном цикле по средней по площади боковой поверхности контейнера избыточной температуре с учетом зависимости теплофизических свойств воздуха при температуре $T = (t_w + t_0)/2$. Некоторые результаты математического моделирования теплового режима контейнеров при температуре поступающего воздуха 20 °С приведены на рис. 4.18–4.20.

На рис. 4.18 показано распределение теплового потока на боковой поверхности контейнеров на примере упаковок с ОЯТ реакторов РИТМ-200М и СВБР-100, которые отличаются высотой топливной части в чехлах с ОЯТ (3,3 м для РИТМ-200М и 1,8 м для СВБР-100). Данные приведены на время достижения максимальной температуры на боковой поверхности (примерно 65 сут для РИТМ-200М и 75 сут для СВБР-100).

Как видно из рис. 4.18, увеличение высоты источника тепла приводит к более равномерному распределению плотности теплового потока и, следовательно, к более равномерному нагреву поверхности контейнера. Флуктуации теплового потока

в верхней части контейнера обусловлены влиянием теплофизических свойств стальных крышек и прокладки между ними. Указанная особенность находит свое влияние и на формирование температурного поля на поверхности контейнера.

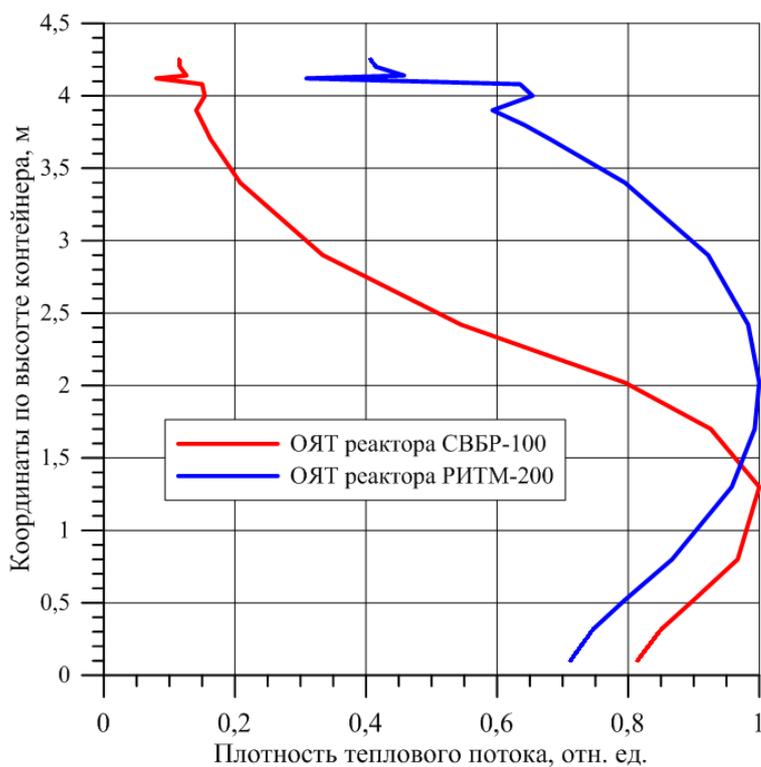


Рис. 4.18. Относительное распределение расчетной плотности теплового потока по высоте боковой поверхности контейнера в наиболее разогретой области (вдоль центральной оси модели)

Как отмечалось ранее, главной задачей в определении тепловой безопасности хранилища ОЯТ реакторов АСММ является оценка максимальных температур ТВС (350 °С для реакторов водо-водяного типа и 430 °С для реакторов типа СВБР) и максимальной температуры наружной поверхности (85 °С). Для иллюстрации указанных параметров теплового состояния контейнеров с ОЯТ на рис. 4.19 и 4.20 приведены расчетные данные по динамике изменения максимальной температуры в зоне размещения ТВС и максимальной температуры поверхности контейнеров с ОЯТ из реакторов «УниTERM», РИТМ-200М и СВБР-100.

В обобщенном виде результаты изучения теплового состояния контейнеров с ОЯТ приведены в табл. 4.30. Из данных, приведенных в этой таблице, видно, что для контейнера с ОЯТ РУ СВБР-100 при времени выдержки топлива 21 год в условиях свободно-конвективного теплообмена прогнозируется практически предельно допустимая температура на его поверхности.

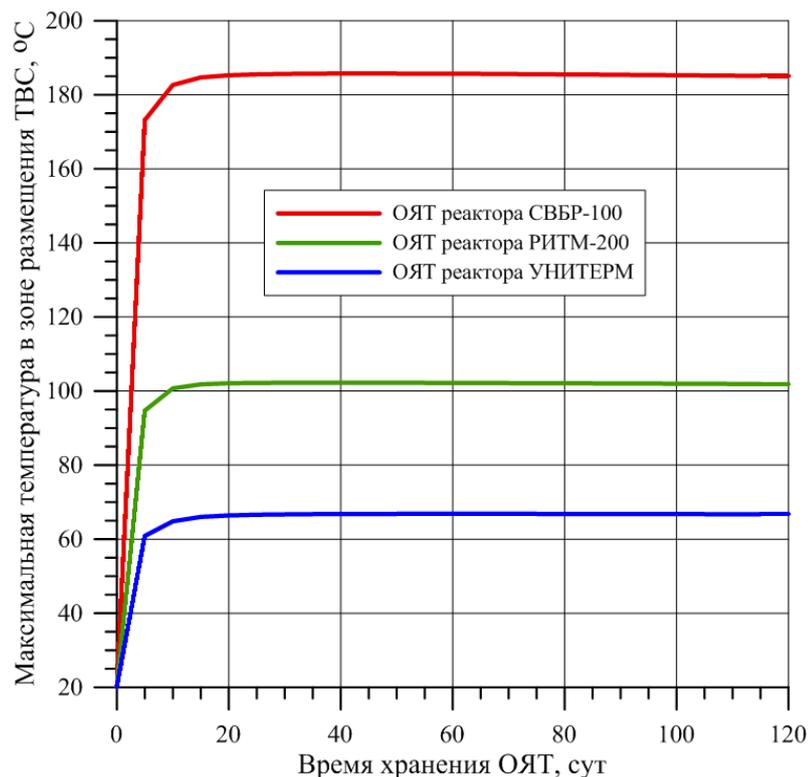


Рис. 4.19. Динамика изменения максимальной температуры в зоне размещения ТВС

Таблица 4.30

Параметры теплового режима контейнера ТУК-120 на стадии разогрева

Тип реактора	Максимальная температура, °C		Продолжительность стадии разогрева контейнера, сут
	в зоне размещения ТВС	на боковой поверхности контейнера (коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К))	
АБВ	83,4	47,6 (3,34)	70
«УниTERM»	66,8	41,0 (2,97)	100
РИТМ-200М	102,3	56,5 (3,76)	65
СВБР-10	145,9	69,7 (3,75)	80
СВБР-100	185,7	84,5 (4,03)	75

Полученные данные показывают, что при меньшей выдержке ОЯТ данного типа для обеспечения нормативных требований по тепловой безопасности сухого хранения топлива реактора СВБР-100 более оптимальным будет использование контейнера ТУК-108/1, который предназначен для одноярусного размещения ОТВС и который, соответственно, будет характеризоваться меньшей энергонапряженностью.

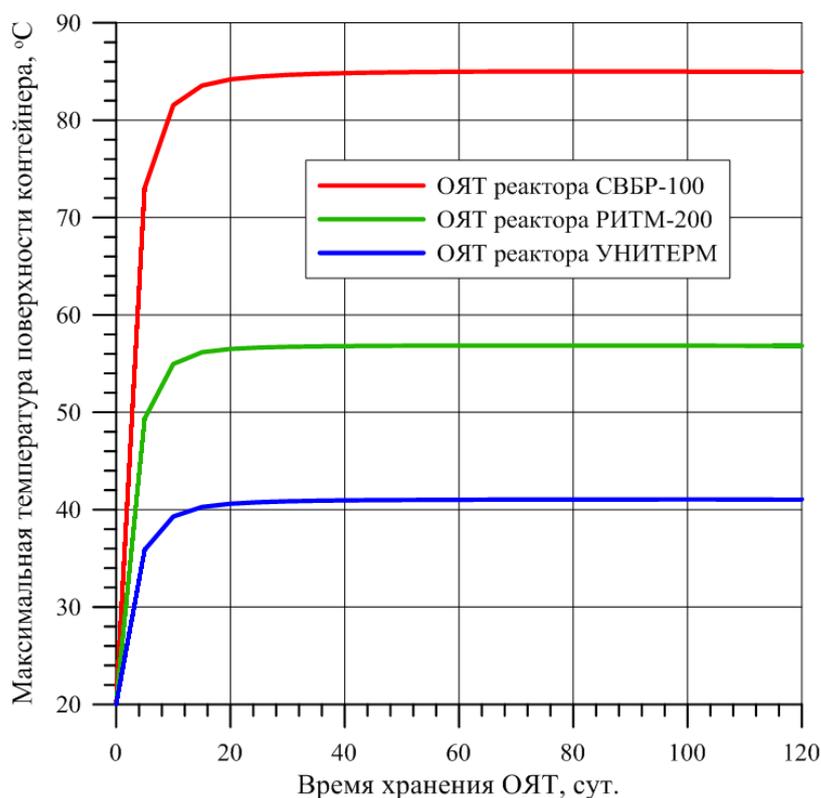


Рис. 4.20. Динамика изменения максимальной температуры поверхности контейнера

Результаты расчетных исследований теплового режима контейнеров ТУК-120 в целом позволяют сделать предварительный вывод о том, что интенсивность свободно-конвективного теплообмена может обеспечить отвод остаточных тепловыделений при обеспечении нормативных требований по тепловой безопасности сухого хранения контейнеров с ОЯТ из реакторов различного типа, рассмотренных в настоящей работе.

4.6. Параметры площадок в подземных модулях для размещения контейнеров с ОЯТ

Результаты исследований различных аспектов безопасности позволяют сформулировать концептуальные положения в части компоновки и размера площадок для размещения контейнеров с ОЯТ реакторов АСММ различного типа. Рассмотренные ранее результаты исследований были получены при консервативном предположении о двухъярусном размещении ОТВС во внутренней полости контейнера ТУК-120. Вместе с тем проектные массогабаритные параметры таких контейнеров накладывают ряд ограничений на размещение в них облученного топлива. Так, например, проектный максимальный вес загруженного контейнера ТУК-120 (не более 40 т) ограничивает загрузку ОЯТ

из реакторов типа СВБР, в соответствии с которым допустимый вес топлива, загружаемого в контейнер, может быть обеспечен только при одноярусном размещении ТВС из активных зон таких реакторов. Для ОЯТ реактора РИТМ-200М ограничение обусловлено габаритными параметрами ТВС, которые, в частности, характеризуются высотой активной (топливной) части ТВС данного типа (1,65 м). Не рассматривая технологические возможности разрезки ТВС с целью отделения ее топливной части (вероятно, с концевыми элементами конструкции), можем сказать, что представляется проблематичным двухъярусное размещение ТВС данного типа во внутренней полости контейнера ТУК-120 высотой 3,53 м.

Указанные ограничения, с одной стороны, способствуют снижению энергонапряженности контейнеров и параметров теплового состояния контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов СВБР и РИТМ-200М, с другой стороны, обуславливают увеличение количества контейнеров для размещения ОЯТ, накопленного за время эксплуатации АСММ.

Ранее (раздел 4.4) по результатам изучения ядерной безопасности были установлены ядерно безопасные компоновки ТУК-120 тепловыделяющими сборками при их двухъярусном размещении. Эти данные позволяют определить число контейнеров, необходимое для размещения ОЯТ для каждого типа РУ АСММ. В исследованиях радиационной безопасности хранилищ ОЯТ (раздел 4.3) подтверждены радиационно безопасные для персонала расстояния между контейнерами, которые при известном числе контейнеров позволяют оценить размеры площадок в подземных модулях для размещения контейнеров ТУК-120 с топливом из различного типа РУ АСММ. Сводные данные о параметрах площадок хранилищ ОЯТ, ориентировочно оцененных при 60-летнем ресурсе АСММ с учетом отмеченных ранее ограничений по размещению ТВС в контейнере ТУК-120 с ОЯТ из реакторов РИТМ-200М и СВБР, приведены в табл. 4.31.

Таблица 4.31

Параметры площадок для размещения контейнеров ТУК-120 с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа

Тип РУ	Число отработавших АЗ	Число контейнеров в модуле хранилища	Размеры площадок (ширина × длина), м
«УниTERM»	3	12	6,35×9,75
АБВ	5	15	6,35×12,45
РИТМ-200М	8	76	11,05×42,15
СВБР-10	3	12	6,35×9,75
СВБР-100	8	70	11,05×36,75

Как видно из табл. 4.31, особенностью хранилищ ОЯТ рассматриваемых АСММ являются значительные различия в количестве контейнеров, необходимых для размещения ОЯТ, образовавшегося за время эксплуатации реакторной установки: от минимального количества (12 ед.) — для РУ типа СВБР-10 и «УниTERM» до максимального (76 ед.) — для РУ типа РИТМ-200М.

Минимальные размеры площадки 6,35×9,75 м принадлежат хранилищам облученного топлива из реакторов СВБР-10 и «УниTERM» при размещении контейнеров в 4 ряда по 3 контейнера в ряду.

Выводы по главе 4

1. На основе анализа информации об отечественных инновационных проектах АСММ установлены основные физико-технические параметры реакторов малой мощности, разрабатываемых в России и отличающихся технологией теплоносителя: водо-водяных (АБВ, «УниTERM», РИТМ-200М) и жидкометаллических (СВБР-10 и СВБР-100).

2. Разработаны математические модели топливных циклов РУ АСММ с корпусными водо-водяными и жидкометаллическими реакторами, и методами компьютерного моделирования определены массовые изотопные составы и радиоактивность ОЯТ этих реакторов. По результатам исследований обоснован вывод о применимости технологии обращения с ОЯТ судовых реакторов-прототипов к реакторам атомных станций малой мощности.

3. Выполнены расчетные исследования ослабления нейтронного и гамма-излучения в биологической защите контейнера ТУК-120. На основе этих исследований определены дозовые характеристики поля ионизирующих излучений вблизи контейнера и показана радиационная безопасность контейнеров ТУК-120, загруженных облученным топливом реакторов АСММ различного типа.

4. На основе разработанной математической модели переноса нейтронов в материальной среде контейнера ТУК-120 проведены расчетные исследования нейтронно-физических процессов в контейнере, загруженном ядерным топливом, и выполнены оценки эффективного коэффициента размножения нейтронов для состояний нормальной эксплуатации и аварийного обводнения при разгерметизации крышек контейнера и чехлов с отработавшими ТВС. По результатам исследований обоснована ядерная безопасность контейнера ТУК-120 с топливом из реакторов рассмотренных АСММ.

5. Разработана методология, и проведены расчетные исследования температурных режимов контейнера ТУК-120 на стадии разогрева после загрузки в контейнер облученного топлива. Определены максимальные температуры в зоне размещения отработавших ТВС и на поверхности контейнера. По результатам исследований показана тепловая безопасность хранения ОЯТ РУ АСММ в контейнерах ТУК-120.

6. На основе анализа режимов эксплуатации РУ и установленных в исследованиях параметров безопасности хранилища контейнерного типа определены количество контейнеров для хранения ОЯТ, образующегося за время эксплуатации РУ, и размеры площадок для размещения контейнеров в подземном модуле АСММ.

Литература к главе 4

1. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива / В. М. Колобашкин, П. М. Рубцов, П. А. Ружанский, В. Д. Сидоренко. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 382 с.

2. *Наумов, В. А.* Программный комплекс «КРАТЕР» для расчета нейтронно-физических характеристик тепловых ядерных реакторов : препринт ИПЭ-14 / В. А. Наумов, И. Е. Рубин, Н. М. Днепровская ; Ин-т проблем энергетики АН Беларуси. Минск, 1996. 39 с.
3. *Адамов, Е. О.* Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания / Е. О. Адамов. Текст : электронный // Инновации Росатома : [сайт]. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf> (дата обращения: 06.10.2015).
4. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н. И. Воропай, Б. Г. Санеев, И. Ю. Иванова, А. К. Ижбулдин // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики : в 2 томах. Т. 2 / под редакцией акад. РАН А. А. Саркисова. Москва : Академ-Принт, 2015. С. 59–71.
5. *Егоров, С. В.* Потенциал создания энергоисточников на базе АСММ для применения в условиях Арктической зоны / С. В. Егоров. Текст : электронный. URL: http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/4/5Egorov.pdf (дата обращения: 28.10.2016).
6. Опыт создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов / В. И. Макаров, Б. Г. Пологих, Н. С. Хлопкин [и др.] // Атомная энергия. 2000. Т. 89, вып. 3. С. 179–188.
7. Выгрузка, хранение и последующее обращение с ОЯТ жидкометаллических реакторов: состояние и проблемы / С. В. Игнатьев, А. Н. Забудько, А. В. Зродников [и др.] // Научные и технические проблемы обеспечения безопасности при обращении с ОЯТ и РАО утилизируемых АПЛ и НК с ЯЭУ : материалы междунар. науч. семинара : в 2 томах. Т. 1. Москва : Комтех-Принт, 2007. С. 189–208.
8. Status of small reactor designs without on-site refuelling. IAEA-TECDOC-1536. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1536_web.pdf (accessed: 18.11.2016).
9. Внедрение кассетной активной зоны, удовлетворяющей требованиям нераспространения, на головной АТЭС ММ на базе плавучего энергоблока с реакторными установками КЛТ-40С в г. Северодвинске Архангельской области / О. Б. Самойлов, О. А. Морозов, В. Н. Алексеев, В. М. Беляев // Малая энергетика — 2005 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2005. С. 99–104.
10. *Алексеев, П. Н.* Увеличение энергозапаса кассетной активной зоны реактора КЛТ-40С при переходе к топливной композиции на основе диоксида урана. Техническая справка / П. Н. Алексеев, А. В. Чибиняев, А. А. Полисмаков ; Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский институт». 2005. Текст : электронный. URL: <http://shkolnie.ru/fizika/18416/index.html> (дата обращения: 10.11.2016).
11. Расчет кампании реактора СВБР-100 с учетом движения органов регулирования и компенсации / А. В. Воронков, Е. П. Сычугова, А. В. Дедуль [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. 2009. С. 38–43. (Обеспечение безопасности АЭС, вып. 24 : Реакторные установки СВБР).
12. *Климов, Н. Н.* Свинцово-висмутовые быстрые реакторы для атомных станций малой и средней мощности / Н. Н. Климов. Текст : электронный. URL:

<http://www.slideshare.net/myatom/klimov-gidropress-svbr> (дата обращения: 13.07.2015).

13. *Наумов, В. А.* Радиоактивность отработавшего ядерного топлива судовых реакторных установок, хранящегося на Кольском полуострове / В. А. Наумов, С. А. Гусак, Е. В. Караваяева // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы IV Междунар. конф. Томск : Томский политехн. ун-т, 2013. С. 382–386.
14. Проектные решения реакторной установки РИТМ-200, предназначенные обеспечить экологически безопасную и экономически эффективную эксплуатацию универсального атомного ледокола на арктических трассах / К. Ю. Князевский, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 86–91.
15. Разработка твэлов активных зон плавучих энергоблоков (ПЭБ) и атомных станций малой мощности (АСММ): состояние и перспективы / А. В. Ватулин, Г. В. Кулаков, В. А. Лысенко, А. В. Морозов // Вопросы атомной науки и техники. 2005. № 2 (65). С. 146–148. (Материаловедение и новые материалы).
16. *Конюхов, Р. А.* Разработка конструкции бокового отражателя активной зоны РУ СВБР-100 / Р. А. Конюхов. Текст : электронный. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2014/documents/kms2014-006.pdf> (дата обращения: 26.01.2015).
17. *England, T. R.* Evaluation and Compilation of Fission Product Yields. Report LA-UR-94-3106, ENDF-349 / T. R. England, B. F. Rider ; Los Alamos National Laboratory, USA. Los Alamos, 1994. 173 p. URL: <http://t2.lanl.gov/nis/publications/endl349.pdf> (accessed: 29.01.2017).
18. *Гуськов, В. А.* Создание, промышленное освоение и введение в эксплуатацию российских двухцелевых транспортно-упаковочных комплектов для транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива / В. А. Гуськов, В. Г. Долбенков // Ядерная и радиационная безопасность России : сб. тр. Вып. 6. Москва : ЦНИЛЮТ, 2009. С. 109–122. Текст : электронный. URL: http://www.fcp-radbez.ru/images/stories/FCP/materiali/sbornik_6.pdf (дата обращения: 21.01.2019).
19. *Watts, N.* Construction of the cask type storage facility at the Federal State Unitary Enterprise Atomflot / N. Watts. URL: www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/documents/plenary_20_3E.pdf (accessed: 20.03.2015).
20. Об утверждении заключения государственной экологической экспертизы проекта «Реконструкция здания 5 на ФГУП «АТОМФЛОТ» под хранилище контейнерного типа для хранения (до 50 лет) неперабатываемого отработавшего ядерного топлива атомного ледокольного флота» : приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.02.2005 № 118. Текст : электронный. URL: docs.cntd.ru/document/901950066 (дата обращения: 28.03.2015).
21. Оценка воздействия на окружающую среду при сооружении опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем в Ульяновской области : в 3 книгах. Кн. 1. Текст : электронный. URL: http://akmeengineering.com/assets/files/OVOS/OVOS_soo_kn1.pdf (дата обращения: 20.03.2017).

22. Защита от ионизирующих излучений : в 2 томах. Т. 1. Физические основы защиты от излучений / Н. Г. Гусев, Л. Р. Кимель, В. П. Машкович [и др.]. Москва : Атомиздат, 1969. 471 с.
23. *Гольдштейн, Г.* Основы защиты реакторов / Г. Гольдштейн ; [перевод с английского]. Москва : Госатомиздат, 1961. 343 с.
24. *Горин, Н. В.* Обоснование ядерной и радиационной безопасности контейнера для отработавших ТВС реакторов АМБ Белоярской АЭС / Н. В. Горин, Я. З. Кандиев, Ю. И. Чернухин // Атомная энергия. 2006. Т. 100, вып. 6. С. 423–428.
25. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на Европейском Севере России / Н. Н. Мельников, В. П. Конухин, В. А. Наумов [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2010. 305 с.
26. *Гуськов, В. А.* Создание, промышленное освоение и введение в эксплуатацию российских двухцелевых транспортно-упаковочных комплектов для транспортирования и хранения отработавшего ядерного топлива / В. А. Гуськов, В. Г. Долбенков // Ядерная и радиационная безопасность России. Москва, 2009. Вып. 6. С. 109–122. Текст : электронный. URL: http://www.fcp-radbez.ru/images/stories/FCP/materiali/sbornik_6.pdf (дата обращения: 21.01.2019).
27. Патент № 2100304 Российская Федерация. Сырьевая смесь для приготовления особо прочного и тяжелого бетона : заявл. 12.03.1996 : опубл. 27.12.1997. Текст : электронный. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2100304> (дата обращения: 17.01.2019).
28. Патент № 2153715 Российская Федерация. Железобетонный контейнер для транспортировки и/или хранения отработавшего ядерного топлива : заявл. 23.03.1999 : опубл. 27.07.2000. Текст : электронный. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2153715> (дата обращения: 17.01.2019).
29. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-16). Текст : электронный. URL: <https://minjust.consultant.ru/files/22399> (дата обращения: 19.03.2019).
30. Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России : в 2 частях. Ч. 2 / Н. Н. Мельников, В. П. Конухин, В. А. Наумов [и др.]. Апатиты : КНЦ РАН, 2003. 209 с.
31. Описание ослабления нейтронов в биологической защите методом вероятностей прохождения : препринт ИПЭ-17 / В. А. Наумов, И. Е. Рубин, Н. М. Днепровская [и др.]. Минск : ИПЭ АН Беларуси, 1996. 28 с.
32. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Текст : электронный. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения: 25.10.2016).
33. *Гуськов, В. Д.* Расчетно-теоретическое и экспериментальное обоснование безопасности металлобетонного контейнера ТУК-108/1 для хранения и транспортирования ОЯТ атомных подводных лодок и кораблей с атомными энергетическими установками / В. Д. Гуськов, Г. В. Коротков // Ядерная и радиационная безопасность России. Москва : ЦНИЛЮТ, 2009. Вып. 6. С. 302–311. Текст : электронный. URL: http://www.fcp-radbez.ru/images/stories/FCP/materiali/sbornik_6.pdf (дата обращения: 21.01.2019).

34. *Кудрявцов, А. В.* Расчетно-экспериментальное определение температурного состояния элементов транспортного упаковочного контейнера с отработавшим топливом / А. В. Кудрявцов, Е. А. Овсянников // Атомная энергия. 2006. Т. 100, вып. 6. С. 428–431.
35. American National Standard for Decay Heat Power in Light Water Reactors. ANSI/ANS-5.1-1979/ American Nuclear Society. La Grand Park, IL, 1979. 50 p.
36. Heat removal study for a new type cask storage facility / H. Takeda, T. Koga, M. Wataru, K. Sakamoto. URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/015/3015263.pdf (accessed: 24.04.2017).
37. *Попов, И. А.* Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободно-конвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена / И. А. Попов ; под общей редакцией Ю. Ф. Гортышева. Казань : Центр инновационных технологий, 2007. 326 с. Текст : электронный. URL: http://elibrary.ru/download/elibrary_25451497_98141610.pdf (дата обращения: 19.04.2017).

Глава 5

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ АСММ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

5.1. Обоснование общих концептуальных представлений о подземных комплексах АСММ различного типа

5.1.1. Общие положения о подземном комплексе АСММ

В связи с освоением различных месторождений полезных ископаемых и обострением геополитической и геоэкономической ситуации вопросы энергообеспечения арктических районов рассматриваются как стратегически важные. Эффективным решением энергетических проблем в труднодоступных арктических регионах может стать строительство на их территориях атомных станций малой мощности подземного размещения.

Подземное размещение АСММ является одним из наиболее перспективных методов повышения безопасности ядерной энергетики и на современном уровне развития техники является осуществимым. Как отмечалось ранее, концепция подземной АСММ базируется на идее использования защитных и изолирующих свойств породного массива, который в сочетании с инженерными защитными барьерами позволяет обеспечить комплексную безопасность энергетического объекта.

Подземное размещение АСММ позволяет получить защиту от любых внутренних (аварии на станции) и внешних воздействий (техногенных, природных, военных и террористических действий). На рис. 5.1 представлена структура многоуровневой защиты подземного комплекса.

Доминирующим фактором при обеспечении пригодности глубинного скального массива является достаточная устойчивость геологической среды по отношению к физическому воздействию (радиация, тепловыделение) и ее низкие фильтрационные свойства, ограничивающие распространение радионуклидов с подземными водами.

Место размещения станции выбирают, руководствуясь основными принципами стабильности геологической среды и структурного блока и исходя из предельно низкого уровня фильтрации грунтовых вод и инертных по отношению к радиоактивным веществам горных пород.

Наметившийся в последние годы интерес к подземному энергетическому строительству связан с наблюдающимся увеличением внешних динамических нагрузок на энергообъекты [1].

Во-первых, это опасность террористических актов, изоциренность которых постоянно возрастает. Предполагается, что террористы могут обладать всеми новейшими видами наступательного вооружения, поэтому особое внимание уделяется антитеррористическим мероприятиям в области энергетики, в частности атомной.

Во-вторых, это постоянно возрастающий объем природных катаклизмов по всему земному шару: вулканическая и сейсмическая активность, торнадо, цунами и другие явления.

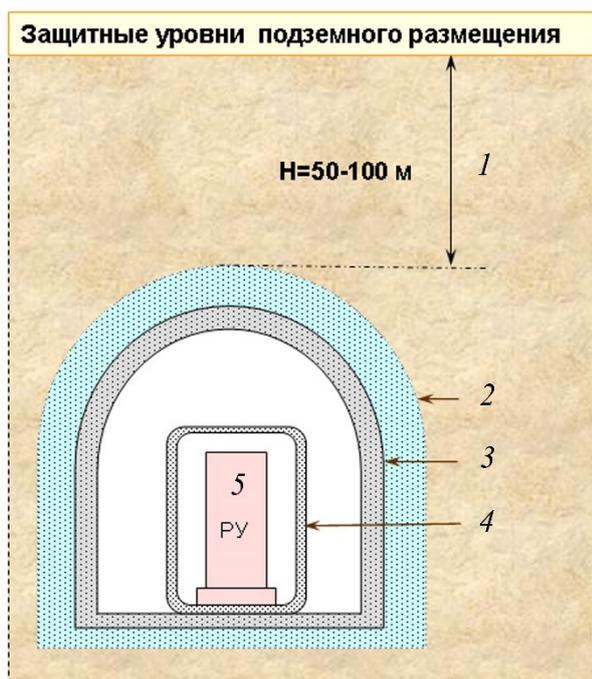


Рис. 5.1. Принципиальная схема структуры многоуровневой защиты подземного комплекса:
 1 — слой горных пород; 2 — гидроизоляционный слой 1–5 м;
 3 — железобетонная крепь 0,5–1 м; 4 — защитная оболочка реактора;
 5 — реакторная установка

Сложность эксплуатации наземных АЭС, большая часть которых расположена по берегам рек и на побережьях для организации технических систем отвода тепла, была подтверждена тяжелой аварией на японской станции Фукусима в 2011 г. Причиной аварии было сильное землетрясение в море недалеко от побережья, где располагалась АЭС.

В-третьих, это возрастание числа катастроф антропогенного происхождения: падение самолета, несанкционированный запуск ракет, падение искусственных спутников, взрывы рядом находящихся крупных промышленных объектов и т. д.

В-четвертых, это возрастающая астероидно-кометная опасность. Исследования последствий падения на Землю космических объектов показывают степень возрастания их постоянной угрозы для человечества и для всей земной биосферы.

В-пятых, это глобальная активизация геолого-геофизических и климатических процессов на Земле, имеющая ярко выраженный резонансный или циклический характер. Эти факторы могут изменить климатические и сейсмические нагрузки на сооружения и их основания [1].

Основная идея подземного размещения АСММ заключается в создании безопасных атомных станций с надежной защитой населения и окружающей среды от возможного радиационного воздействия, так как породный массив

при возможной аварии препятствует или значительно уменьшает уровень радиоактивного загрязнения окружающей среды. Общая идеология подземных АСММ базируется на известных преимуществах, к которым относятся [2]:

- самая эффективная защита от внешних воздействий (от падения самолета до боевого ракетного оружия);
- обеспечение безопасности при любых проектных и запроектных авариях реактора, включая паровой взрыв и плавление активной зоны реактора;
- рациональное решение проблемы сбора и хранения радиоактивных отходов;
- принципиальное упрощение и удешевление вывода из эксплуатации станции после выработки проектного срока ее эксплуатации;
- высокая степень пожарной безопасности по сравнению с наземным расположением за счет методов и средств регулирования состава воздуха в герметичных помещениях;
- размещение АСММ в непосредственной близости от потребителей и повышение за счет этого эффективности использования тепловой и электрической энергии.

Сооружение АСММ возможно практически в любых инженерно-геологических условиях независимо от свойств породного массива. Однако необходима четкая система представлений о геологическом риске строительства атомных станций, без которой создание даже сверхнадежных реакторов не гарантирует полной безопасности. В рамках таких представлений должно обосновываться место строительства АСММ, то есть должны определяться регионы и районы, которые по сейсмическим, структурно-тектоническим, геоморфологическим, гидрогеологическим и другим условиям наиболее благоприятны для возведения станций. Принципиальное значение имеют величина сейсмичности и тектоническая нарушенность территорий. Эти параметры оцениваются на основе общего и детального сейсмического районирования, структурно-тектонического анализа [3].

С точки зрения экономических аспектов подземные АСММ по стоимости строительства несколько дороже наземных сооружений. Это удорожание оценивается для различных стран и условий строительства от 10 до 40 %. Однако в целом упрощается и удешевляется снятие с эксплуатации и захоронение радиоактивного оборудования и радиоактивных отходов после закрытия станции.

Исключение последствий наиболее опасных аварий позволяет располагать станции в непосредственной близости от потребителей и даже в подземном пространстве мегаполисов. Расположение станций в непосредственной близости от потребителей позволяет снизить затраты на передачу электроэнергии и/или тепла за счет сокращения коммуникаций и протяженности ЛЭП. Подземное размещение станции дает возможность существенно снизить социальную и психологическую напряженность среди местного населения. Создание типовых АСММ значительно сокращает стоимость проектирования и строительства станций [4, 5].

Оценка изобретательской активности в области создания подземных атомных станций. В мировой практике имеется небольшой опыт эксплуатации семи подземных атомных станций. Российская подземная атомная станция (Железногорск) показала надежность и безопасность ее эксплуатации.

В настоящее время ряд стран занимается активной разработкой и проектированием подземных комплексов для атомных станций при различных концепциях их размещения. К ним можно отнести некоторые европейские страны, США и особенно Китай. В качестве примера на рис. 5.2 приведена мировая динамика патентования в области строительства подземных атомных станций.

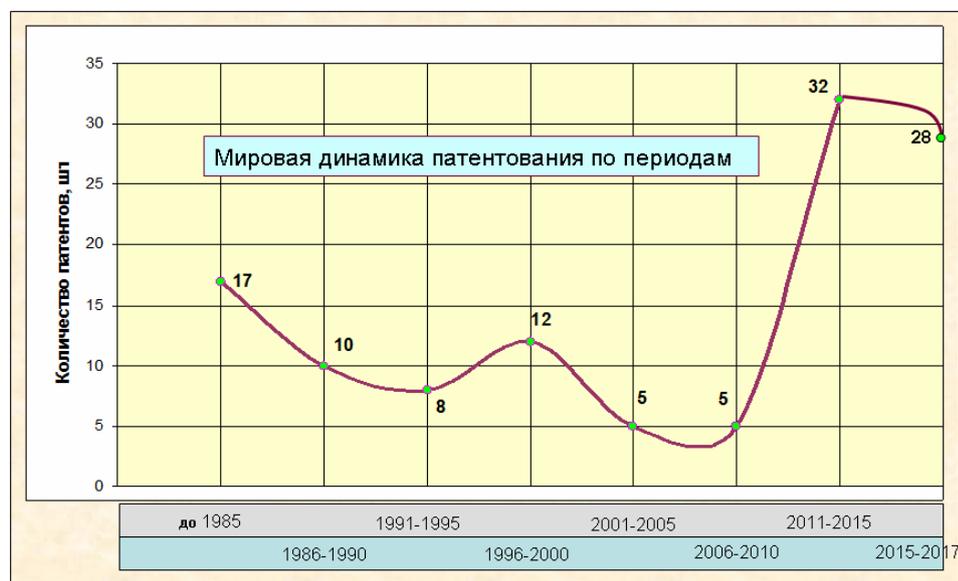


Рис. 5.2. Динамика патентования в области строительства подземных атомных станций

Для оценки мировой ситуации в области строительства подземных атомных станций рассматривался период до 1985 г. (1975–1985 гг.) и далее по настоящее время. Ввиду небольшого количества изобретений по данной тематике для сравнения использовались пятилетние периоды.

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области создания подземных комплексов для размещения атомных станций показывает повышение изобретательской активности в последнее время.

Согласно графику на рис. 5.2, период 2000–2010 гг. можно охарактеризовать как спад в области патентования объектов подземной атомной энергетики. Наибольшая изобретательская активность приходится на 2011–2017 гг. На рис. 5.3 показано соотношение уровня изобретательской активности в области подземного строительства атомных станций среди ведущих стран в этот период времени.

Удельный вес патентования в области подземного строительства атомных станций распределяется следующим образом: Китай — 51,7 %; Россия — 18,3 %; США — 16,7 %; Япония — 13,3 %. Можно полагать, что наибольшая активность в Китае обусловлена реализацией крупнейшей в мире программы развития атомной энергетики. Следует отметить, что совершенствование в области создания подземных атомных станций осуществляется в направлении повышения безопасности подземных объектов на основе обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности.



Рис. 5.3. Соотношение уровня изобретательной активности в области подземного строительства атомных станций

Технические решения, выявленные по российским патентам, направлены на предотвращение аварийных выбросов радиоактивных веществ в биосферу (улавливание, нейтрализация или локализация вредных выбросов), захоронение аварийных реакторов и РАО в подземных выработках, размещение атомных станций в уже имеющихся подземных убежищах ракетно-космического комплекса, возведение над объектами АС металлоледяных укрытий с использованием природных источников холода [6].

Незначительный удельный вес в изобретениях приходится на решение задач, связанных со снижением затрат на строительство и упрощением монтажа станции.

Законодательная база. Регулирование отношений в области использования атомной энергии осуществляется на основе Конституции Российской Федерации, как основного закона, имеющего высшую юридическую силу и прямое действие, а также международных договоров и конвенций. В качестве основных международных конвенций можно выделить:

- Конвенцию о ядерной безопасности;
- Венскую конвенцию об ответственности за ядерный ущерб;
- Объединенную конвенцию о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами;
- Конвенцию об оперативном оповещении о ядерной аварии;
- ряд других, имеющих, согласно п. 4 ст. 15 Конституции РФ, большую юридическую силу, чем федеральные законы.

На следующем регулирующем уровне находятся федеральные законы Российской Федерации, а также подзаконные акты — нормативные правовые акты Президента Российской Федерации и Правительства Российской Федерации.

На более низком уровне находятся: федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, нормативные акты органов государственного регулирования безопасности в области использования атомной энергии и нормативные акты органов управления использованием атомной энергии, а также различные государственные стандарты, нормы и правила [7].

Нормативные документы в общем виде подразделяют на государственные федеральные документы, документы субъектов РФ и производственно-отраслевые документы субъектов хозяйственной деятельности.

Строительные нормы и правила Российской Федерации устанавливают обязательные требования, определяющие цели, которые должны быть достигнуты, и принципы, которыми необходимо руководствоваться в процессе создания строительной продукции.

Государственные стандарты Российской Федерации в области строительства устанавливают обязательные и рекомендуемые положения, определяющие конкретные параметры и характеристики отдельных частей зданий и сооружений, строительных изделий и материалов и обеспечивающие техническое единство при разработке, производстве и эксплуатации этой продукции. В общем виде структура нормативной базы в области строительства подземных АСММ представлена на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Структура нормативной базы в области строительства подземных атомных станций

Наряду с нормативными документами в строительстве применяют:

- государственные стандарты и другие документы по стандартизации, метрологии и сертификации Госстандарта России;
- нормы, правила и нормативы органов государственного надзора;

- стандарты отраслей, нормы технологического проектирования и другие нормативные документы, принимаемые отраслевыми министерствами, государственными комитетами и комитетами в соответствии с их компетенцией [8].

Территориальные строительные нормы устанавливают обязательные для применения в пределах соответствующих территорий и рекомендуемые положения, учитывающие природно-климатические и социальные особенности, национальные традиции и экономические возможности республик, краев и областей России.

Подземное строительство и размещение АСММ. Необходимо отметить, что для атомных станций подземного размещения будут действовать как нормативные документы, относящиеся к атомным станциям, так и, частично, требования при строительстве и эксплуатации подземных объектов в горной промышленности, гидростроительстве и тоннелестроении.

Для объектов горной промышленности и строительства подземных сооружений действует ряд нормативных документов, которые охватывают вопросы строительства и эксплуатации подземных горных выработок с учетом единых требований безопасности.

В настоящее время имеется эффективная и достаточная законодательная нормативная база, регламентирующая вопросы, связанные со строительством и безопасной эксплуатацией атомных станций на дневной поверхности. Также достаточно представлено строительство подземных объектов различной направленности в народном хозяйстве.

Однако в целом необходимо отметить отсутствие исчерпывающей нормативной базы по строительству атомных станций малой мощности в подземных условиях, особенно для условий арктического Севера.

5.1.2. Основные принципы обеспечения безопасности

Безопасность подземной атомной станции должна обеспечиваться на всех этапах жизнедеятельности объекта: проектирование, строительство (реконструкция), эксплуатация и ликвидация объекта с учетом реализации следующих подходов:

- соответствие требованиям действующих норм и правил в области использования атомной энергии, в обеспечении выполнения нормативных критериев безопасности;
- сочетание активного и пассивного принципов функционирования систем безопасности с расширенным применением систем пассивного действия;
- использование свойств внутренней самозащищенности АСММ;
- построение систем безопасности с учетом условий проектных аварий и воздействий, а также условий запроектных аварий [9].

Особая роль подземного размещения связана с обеспечением безопасности при аварийном режиме и запроектных авариях, а также при возникновении различных природных катаклизмов.

Комплексная безопасность обеспечивается за счет последовательной реализации глубоко эшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности, а также по защите персонала, населения и окружающей среды, осуществляемой на всех этапах деятельности, связанных с обеспечением безопасности АС.

Согласно нормативным требованиям, система организационных и технических мер должна образовывать пять уровней глубокоэшелонированной защиты [9].

Уровень 1. Условия размещения АС и предотвращение нарушений нормальной эксплуатации:

- выбор площадки; разработка проекта консервативного подхода с развитым свойством внутренней самозащищенности РУ;
- обеспечение требуемого качества систем и выполняемых работ;
- эксплуатация АС в соответствии с требованиями нормативных документов, технологических регламентов и инструкций по эксплуатации;
- поддержание в исправном состоянии систем (элементов), важных для безопасности, принятия профилактических мер.

Уровень 2. Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации:

- выявление отклонений от нормальной работы и их устранение;
- управление при эксплуатации с отклонениями.

Уровень 3. Предотвращение запроектных аварий системами безопасности:

- предотвращение перерастания исходных событий в проектные аварии, а проектных аварий — в запроектные с применением систем безопасности;
- ослабление последствий аварий, которые не удалось предотвратить, путем локализации выделяющихся радиоактивных веществ.

Уровень 4. Управление запроектными авариями:

- предотвращение развития запроектных аварий и ослабление их последствий;
- защита герметичного ограждения от разрушения при запроектных авариях и поддержание его работоспособности;
- возвращение АС в контролируемое состояние, при котором прекращается цепная реакция деления, обеспечивается постоянное охлаждение ядерного топлива и удержание радиоактивных веществ в установленных границах.

Уровень 5. Противоаварийное планирование:

- подготовка и осуществление при необходимости планов противоаварийных мероприятий на площадке АС и за ее пределами.

Концепция глубокоэшелонированной защиты осуществляется на всех этапах деятельности, связанных с обеспечением безопасности АС в той части, которая затрагивается этим видом деятельности. Приоритетной при этом является стратегия предотвращения неблагоприятных событий, особенно для уровней 1 и 2.

При нормальной эксплуатации все физические барьеры должны быть работоспособными, а меры по их защите должны находиться в состоянии готовности. При выявлении неработоспособности любого из предусмотренных физических барьеров или неготовности мер по его защите РУ должны быть остановлены и приняты меры по приведению блока АС в безопасное состояние [9].

По влиянию элементов АС на безопасность устанавливаются четыре класса безопасности. Класс безопасности является обязательным признаком при формировании других классификаций элементов АС, устанавливаемых в нормативных документах.

Основные системы безопасности. В проекте АС предусматриваются *защитные системы безопасности*, обеспечивающие надежную аварийную остановку реактора и поддержание его в подкритическом состоянии в любых режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, включая проектные аварии. Структура системы безопасности подземной АЭС показана на рис. 5.5.

Также должны быть предусмотрены защитные системы безопасности, обеспечивающие надежную аварийную остановку реактора и поддержание его в подкритическом состоянии в любых режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации, включая проектные аварии.



Рис. 5.5. Структура системы безопасности подземной АЭС

Для удержания радиоактивных веществ при аварии в установленных проектом границах должны быть предусмотрены *локализующие системы безопасности*. Реактор и содержащие радиоактивные вещества системы и элементы АС должны размещаться в герметичных помещениях целиком — для локализации выделяющихся при проектных авариях радиоактивных веществ в их границах.

Локализующие системы безопасности должны быть предусмотрены для каждого блока АС и выполнять заданные функции для проектных и учитываемых запроектных аварий. Все пересекающие границы герметичного ограждения коммуникации, через которые при аварии возможен выход радиоактивных веществ за границы герметичных помещений, должны быть оборудованы изолирующими элементами [9].

Степень повышения безопасности подземной АС определяется в основном прочностью скального массива, возможностью обеспечения герметичности реакторной выработки, защитных шлюзов и проходов

транспортных выработок. Горный массив вокруг реакторной выработки уплотняют путем инъекции цементом или синтетическими смолами, что позволяет предотвратить утечку радиоактивных элементов в случае аварии реактора и образования трещин в массиве.

В проекте АСММ предусматриваются меры по управлению запроектными авариями, в том числе те, что позволяют предотвратить повреждение активной зоны реактора, а также мероприятия, направленные на локализацию и ограничение радиационных последствий повреждения активной зоны реактора.

При проектировании железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций должны соблюдаться требования, содержащиеся в нормативных документах, регламентирующих правила устройства и эксплуатации:

- по герметичности — уровень утечек из сооружения должен ограничиваться пределами, установленными техзаданием на проектирование;
- по условиям биологической защиты — определяются минимальные значения толщины стен, перекрытий и покрытий;
- по долговечности — сооружения должны сохранять пригодность к выполнению своих функций в течение срока эксплуатации АС.

Следует учитывать влияние излучения на изменение характеристик бетона. При интегральном потоке нейтронов, не превышающем $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ за срок службы сооружения, допускается не учитывать влияние излучения.

Обеспечивающие системы безопасности должны иметь показатели надежности выполнения заданных функций, достаточные для того, чтобы в совокупности с показателями надежности систем безопасности, которые они обеспечивают, достигалась необходимая надежность функционирования последних, определяемая в проекте.

Выполнение обеспечивающими системами безопасности функций должно иметь безусловный приоритет над действием внутренних защит элементов обеспечивающих систем безопасности, если это не приводит к более тяжелым последствиям для безопасности.

Проектом АС должны быть предусмотрены необходимые и достаточные средства для противопожарной защиты АС, включая средства обнаружения и тушения горения замедлителя и теплоносителя. Проектом АС должен быть предусмотрен автоматизированный режим работы систем тушения пожаров с момента подачи напряжения на оборудование блока АС при проведении предпусковых наладочных работ. Предусматривается система контроля целостности физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, предназначенная для контроля отклонений от установленных пределов безопасной эксплуатации АС [9, 10].

Система защитных барьеров подземного ядерно-физического объекта содержит защиту:

- от распространения взрывных и сейсмических волн, механических воздействий;

- от распространения огня и газа (выбор огнестойких материалов и конструкций, защитных покрытий, герметизация перегородок, шлюзы, газосборники, изолирующие средства защиты органов дыхания и т. д.);
- от проникновения поверхностных и подземных вод и прорыва технической воды и других жидкостей.

5.1.3. Формирование факторов для выбора конструктивных элементов подземных АСММ

К главным факторам при выборе конструктивных решений подземного комплекса относятся те, использование которых обеспечивает безопасную эксплуатацию АС и минимум возможных техногенных изменений окружающей среды. Выбор и обоснование конструкций подземного комплекса закладывается на этапе проектирования объекта, который можно представить в виде следующего алгоритма принятия решений.

I. На этапе решения вопроса о проектировании АСММ главными факторами будут: принятая концепция подземного объекта, климатические условия, глубина размещения, вид и характеристика оборудования, а также условия и время эксплуатации. Формируются экологически обоснованные требования к подземному объекту.

II. На этапе выбора и оценки площадки под строительство основное внимание отводится способу вскрытия, геологической изученности, различным физико-механическим характеристикам массива и др.

III. На этапе проектирования подземного объекта закладываются основные решения по строительству и решаются задачи обоснования конструктивных решений с точки зрения экологической безопасности, с учетом достигнутого уровня техники и мирового опыта. На основе действующей нормативной документации выбираются конструктивно-компоновочные решения будущего объекта, обосновываются технические параметры всех выработок и модулей. Осуществляется экономическая оценка, определяются сроки строительства.

IV. На этапе строительства объекта реализуются все принятые ранее решения. Большое значение на данном этапе отводится факторам, связанным с технологией строительства и ее безопасностью, осуществляется оценка рисков при строительстве.

V. На этапе эксплуатации подземного комплекса АСММ доминирующее значение приобретают технологические решения по безопасности, заложенные в процессе проектирования и строительства.

В структуре факторов, обуславливающих выбор конструктивно-компоновочных решений с учетом комплексного характера требований, можно выделить несколько взаимосвязанных составляющих:

- горно-геологические условия, определяющие требования при выборе площадок для размещения подземной АСММ;
- технические характеристики подземного комплекса, которые отражают конструктивные и эксплуатационные параметры реакторных установок и конструктивно-компоновочные параметры подземных выработок;
- технологические параметры, характеризующие технические особенности и экономические показатели строительства подземного комплекса;

- блок обеспечения безопасности, в котором интегрированы риски при проведении горно-строительных работ и при эксплуатации всех элементов подземного комплекса.

В общем виде факторы, влияющие на выбор конструктивно-компоновочных проектных решений подземного комплекса, представлены на рис. 5.6.



Рис. 5.6. Факторы, влияющие на выбор конструктивно-компоновочных проектных решений подземного комплекса АСММ [11]

Горно-геологические условия. К основным горно-геологическим условиям можно отнести: рельеф местности в районе строительства, глубину заложения и способ доступа к комплексу, физико-механические, тепловые и сорбционные свойства горных пород, геомеханические процессы и тектонические нарушения, гидрогеологические режимы.

Рельеф местности. Немаловажное значение придается рельефу местности, где предполагается строительство. 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.

Физико-механические свойства пород позволяют составить представление о характере возможных деформаций и степени устойчивости обнажений массива, а также служат основанием для выбора методов разрушения горных пород при ведении горных работ, креплении и поддержании горных выработок в процессе эксплуатации АСММ.

К обязательным контролируемым свойствам пород относятся:

а) физико-механические свойства горных пород, включая значение предельных напряжений, приводящих к началу процесса трещинообразования и нарушения естественных изоляционных свойств горного массива;

б) распределение полей естественных напряжений в массиве горных пород;

в) гидрогеологические режимы в горном массиве;

г) характеристики тектонических нарушений, пересекающих горные выработки;

д) процессы, в том числе геомеханические, определяющие устойчивость подземных сооружений;

е) теплофизические свойства горных пород;

ж) сорбционные свойства горных пород;

з) зависимости теплового влияния и (или) другого влияния размещенной в горной выработке оборудования на свойства вмещающего горного массива.

Технические характеристики комплекса. Атомная станция состоит из комплекса оборудования, систем защиты и управления, из которых выделяют четыре основные группы: реакторная установка с системами внутренней защиты и управления, турбины, генератор и вспомогательное оборудование. 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 выработок; конструкции модулей и вспомогательных выработок; архитектурные решения отдельных систем. Также к важным параметрам, влияющим на конструкцию и компоновку подземного комплекса, следует отнести глубину заложения основного горизонта и способ доступа к подземному комплексу с поверхности.

Сейсмичность. Считается, что устойчивость подземных объектов при сейсмическом воздействии достаточно велика по сравнению с наземными объектами. Подземное размещение объектов снижает интенсивность сейсмических колебаний в 1,5–2 раза по сравнению с размещением на дневной поверхности. Сейсмические явления, как правило, создают дополнительное динамическое воздействие на элементы горного массива, что также может привести к потере прочности и устойчивости горных пород и строительных конструкций.

Термодинамические процессы. Специфический подход к объемно-планировочному решению АСММ в части необходимости рассмотрения тяжелых аварий с плавлением топлива накладывает жесткие требования на конструкции горных выработок по стойкости к экстремальным термодинамическим процессам. Показатели давления и температуры зависят от типа реакторов, размеров горных выработок, сценариев протекания аварий и прогнозируются в пределах от 10 до 200 атмосфер и сотен градусов. Поэтому при подземном размещении АСММ размеры выработок, связывающие камеру реакторного отделения со вспомогательными системами, должны быть минимизированы, а установленные в них локализирующие барьеры рассчитаны на максимальные нагрузки.

5.2. Обоснование конструктивных и объемно-компоновочных моделей подземных комплексов АСММ

5.2.1. Оценка параметров подземных выработок для размещения основного оборудования АСММ с реакторными установками различного типа

Оценка способа доступа. Важную роль в архитектуре подземного комплекса с точки зрения обеспечения безопасности отводится способу доступа. Технологические решения по определению способа доступа к подземному комплексу являются основой в выборе схемы строительства, применяемого оборудования, обоснования экономических затрат при эксплуатации атомной станции. При сравнении вариантов доступа необходимо учитывать факторы, которые, прежде всего, влияют на безопасность строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации подземного комплекса.

Способ доступа к подземному комплексу характеризуется типом главной вскрывающей выработки, с помощью которой осуществляется связь с подземным пространством, и расположением относительно подземного комплекса. При выборе способа доступа влияние рельефа, геологических и горнотехнических факторов учитывается комплексно. Горно-геологические условия и рельеф местности определяют выбор способа доступа (вскрытия), к дополнительным влияющим факторам можно отнести минимальные капитальные затраты на строительство.

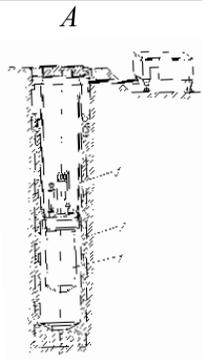
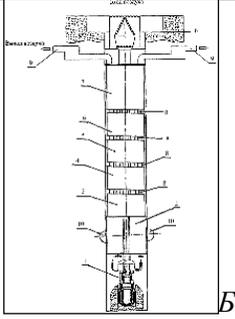
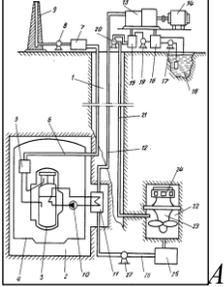
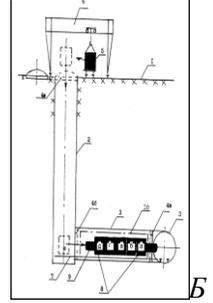
В настоящее время в мировой практике рассматриваются различные способы доступа к подземному комплексу. К основным из них можно отнести доступ через вертикальные (стволы) и наклонные выработки (уклоны и спиральные съезды), горизонтальные выработки (штольни, тоннели), а также их различные комбинации. Рассмотрим основные характерные варианты доступа к подземному комплексу атомных станций, используемые в международной практике проектирования (табл. 5.1).

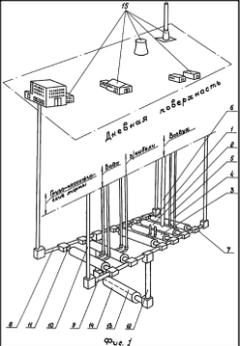
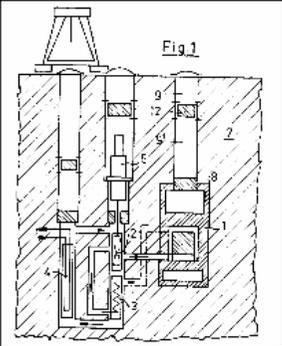
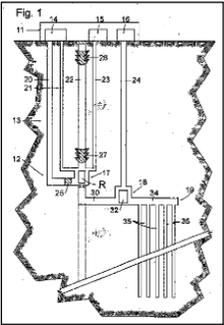
Шахтный вариант. Вскрытие вертикальным стволом получило преимущественное распространение при горизонтальном рельефе. Как правило, для доступа к подземной атомной станции и размещения оборудования используется одна или несколько вертикальных выработок. Может быть как единичный вертикальный ствол, так и несколько вертикальных выработок с комплексом подземных околоствольных выработок.

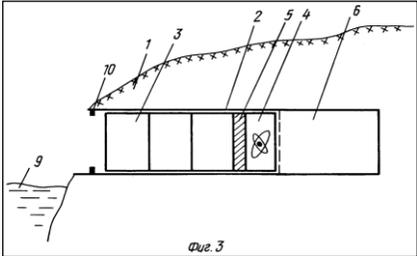
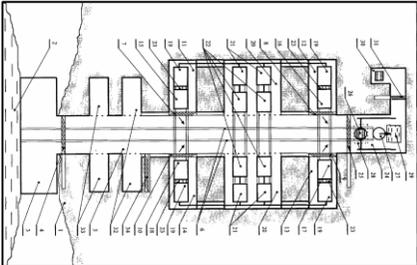
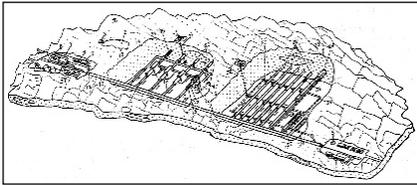
Строительство вертикального ствола — одна из сложных и трудоемких работ в горном строительстве. В качестве основных преимуществ можно выделить возможное строительство на любом рельефе, затруднения для несанкционированного проникновения в подземное пространство.

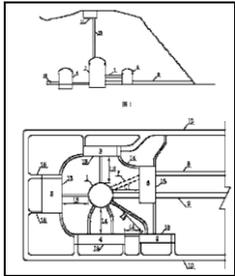
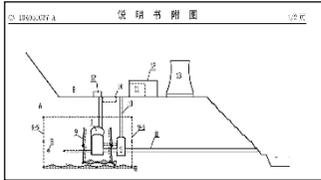
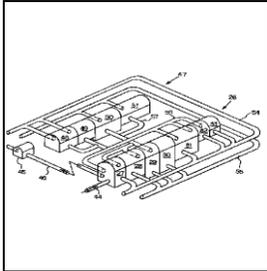
Недостатки: сложность и большая стоимость строительства вертикальной выработки; цикличность подъемных операций и зависимость от работы подъемного оборудования, что затрудняет организацию контроля и аварийного управления; ограниченный доступ к подземному объекту при эксплуатации, ограничения на доставку по стволу крупногабаритного оборудования.

Основные характерные способы доступа к подземному комплексу

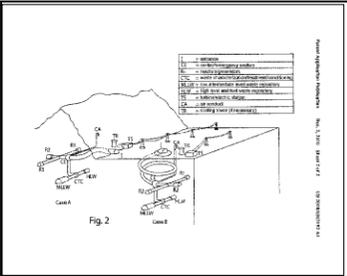
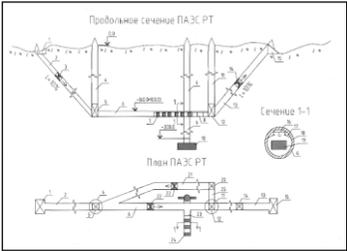
Краткая характеристика технического решения	Принципиальная схема	
Шахтный вариант		
<p><i>Расположение реактора в вертикальной тупиковой выработке.</i> <i>(А) Патент 2061265 (Россия).</i> В качестве подземного сооружения используют существующие конструкции шахтной пусковой установки (ШПУ), оборудованной системой динамической сейсмоизоляции. Машинный зал располагается на поверхности (патент прекратил действие). <i>(Б) Патент 2393562 (Россия).</i> Весь комплекс оборудования подземной станции выполнен в виде модулей и размещен над модулем атомного реактора по высоте шахты. Модуль атомного реактора изолирован от остальных модулей комплекса устройством аварийной изоляции</p>		
<p><i>Расположение реактора в камерной околоствольной выработке.</i> <i>(А) Патент. 1828710 (Россия).</i> Реактор и комплекс оборудования подземной станции располагается в камерных выработках, примыкающих к вертикальному стволу. Реактор в камерной выработке помещён в защитную оболочку. <i>(Б) Патент 2095862 (Россия).</i> Размещение атомных станций в уже имеющихся подземных убежищах ракетно-космического комплекса. Используется вертикальная шахта и горизонтально расположенные камеры со штатными затворами. Компактные модули, выполнены на базе судостроительных технологий</p>		

Краткая характеристика технического решения	Принципиальная схема	
<p>Доступ к подземному комплексу через несколько вертикальных выработок.</p> <p>(А) Патент 2273901 (Россия). Комплекс оборудован рядом вертикальных стволов. Подземные выработки под технологические блоки размещены на двух сообщающихся уровнях, на нижнем уровне находится хранилище отработанного ядерного топлива.</p> <p>(Б) Патент 4000038 (США). Доступ в основные камеры подземного комплекса осуществляется со стороны поверхности через отдельные вертикальные выработки. Каждый вертикальный ствол оборудуется защитной перемычкой</p>	<p style="text-align: center;">А</p> 	<p style="text-align: center;">Б</p> 
<p>Заявка US2009135986 (США). Основные камеры подземной атомной станции имеют независимые, отдельные вертикальные выработки доступа. Предусмотрено три основных эксплуатационных уровня по высоте, на нижнем уровне находится хранилище радиоактивных материалов</p>		

Краткая характеристика технического решения	Принципиальная схема
Штольневый вариант	
<p><i>Доступ через одиночную горизонтальную выработку.</i> Патент 2218614 (Россия). Штольневый вариант в тупиковой выработке. Энергоблок располагают в подземной штольне с дополнительной полостью, в которую помещают энергоблок при выводе станции из эксплуатации. Выгрузку отработавшего ядерного топлива производят непосредственно в штольне</p>	 <p>Фиг. 3</p>
<p>Патент 2222839 (Россия). Подземная атомная теплоэлектростанция выполнена в виде укрупненных модулей, расположенных по обе стороны горизонтальной транспортной выработки (штольни). Комплекс оборудован системами безопасности и грузовыми путями для доставки по ним в подземной выработке укрупненных модулей</p>	
<p>Компоновочные решения проекта ПАЭС штольневого типа ОАО «ВНИИПромтехнология». Линейное расположение реакторных и вспомогательных камер вдоль основной транспортно-вентиляционной штольни по одну сторону, дополнительно используются вертикальные выработки [12]</p>	

Краткая характеристика технического решения	Принципиальная схема
<p>Доступ через группу горизонтальных выработок. Патент 104134477 (Китай). Подземная атомная станция с изолированным ядерным реактором и группой выработок с кольцевым расположением вокруг реакторного помещения. Доступ в подземный комплекс осуществляется через четыре горизонтальные выработки. Вода для охлаждения реактора подается через вертикальную выработку. Кольцевая форма расположения, упрощает строительство, эксплуатацию и эвакуацию с подземной ядерной электростанции</p>	
<p>Патент 104051037 (Китай.) Подземная атомная станция террасового типа. Доступ к подземному комплексу осуществляется по трем горизонтальным штольням, а также через две дополнительные вертикальные выработки. Такое решение подходит для местности, где нет надлежащей площадки в районе штолен</p>	
<p>Патент 0915360 (Япония). Подземная изолированная ядерная станция оборудована рядом штолен, расположенных на двух уровнях по высоте. Подземный комплекс состоит из двух протяженных камер различного сечения, расположенных параллельно. Это позволяет обеспечить хорошую коммуникацию между основным оборудованием</p>	

Окончание таблицы 5.1

Краткая характеристика технического решения	Принципиальная схема
Доступ через наклонную выработку	
<p>Патент 2010303192 (США). Доступ к подземному объекту осуществляется через спиральный съезд (равнинная поверхность).</p> <p>Подземный энергетический комплекс располагается на двух уровнях. Горизонты соединены между собой вертикальной выработкой, что дополнительно изолирует горизонт хранения радиоактивных материалов</p>	
<p>Проект ЗАО «Институт «Оргэнергострой» [13]. Принципиальное конструктивно-технологическое решение подземной атомной электростанции равнинного типа. Основные выработки доступа наклонные. Ряд вертикальных выработок используется для обслуживания и проветривания комплекса</p>	

Штольневый вариант. Для доступа и размещения оборудования используется одна или несколько горизонтальных выработок. Применяется в гористой или сильнопересеченной местности. Когда позволяет рельеф местности, этот способ предпочтительней. Устья штолен располагают в местах, не подверженных затоплению сезонными водами. Вскрытие штольней имеет ряд достоинств перед другими способами доступа: удобный способ строительства и эксплуатации, связанный с доставкой материалов и оборудования (особенно крупногабаритного); высокая концентрация производства при строительстве; отсутствие механического подъема на поверхность; простота организации проветривания выработок и отсутствие затрат на подъем и водоотлив; простота поверхностных сооружений (нет надшахтных зданий); самый простой и экономичный способ вскрытия, а также минимальные первоначальные капитальные затраты и сроки строительства подземного комплекса.

Наклонные выработки. Применяются практически при любом рельефе. При угле наклона вскрывающей выработки до 12° экономически приемлемым считается проводить вскрытие до глубины 100–150 м, так как возрастает протяженность главных вскрывающих выработок (более 1 км), за счет чего повышается объем горно-строительных работ и стоимость строительства.

В целом, использование для вскрытия одиночной тупиковой (вертикальной или горизонтальной) горной выработки как для доступа, так и для размещения реактора можно считать не совсем оправданным, поскольку это снижает защитные характеристики подземного комплекса. Прямолинейное расположение реакторного блока относительно выхода на дневную поверхность существенно повышает риски от воздействия летательного аппарата и террористических угроз.

Оценки технического уровня перспективных конструктивно-компоновочных решений, отвечающих требованиям безопасности, показывают, что при наличии сопутствующего горного рельефа предпочтение отдается штольневому варианту доступа к подземному комплексу, а при равнинном рельефе шахтному варианту с использованием вертикальных или наклонных выработок.

Оценка глубины заложения. Глубина заложения подземной АСММ обосновывается с учетом свойств горных пород, параметров внешних природных и техногенных воздействий на объект и ее потенциального влияния на окружающую среду.

Конструктивные и объемно-планировочные решения подземных сооружений также связаны с глубиной их заложения от поверхности земли. Оценка безопасной эксплуатации подземного комплекса базируется в основном на устойчивости и герметичности скального массива, в котором он размещается. С точки зрения защитных свойств с увеличением глубины заложения станции повышается ее безопасность как от внешних, так и от внутренних воздействий на станцию. Поскольку скальные породы являются естественным защитным фильтром, в случае аварии выброс радиоактивности в атмосферу будет в сотни (тысячи) раз меньше, чем при наземном ее размещении. Подземные защитные оболочки выдерживают нагрузку на несколько порядков больше, чем любые железобетонные и металлические защитные конструкции в наземных АС.

Оптимальная глубина заложения подземного комплекса определяется толщиной скального массива, которая позволяет исключить процесс распространения радиоактивных выбросов в атмосферу в результате избыточного

давления, возникающего при максимальной проектной аварии. Одним из критериев определения глубины заложения, следует из некоторых литературных источников, является недопустимость образования сквозных трещин от подземного сооружения до дневной поверхности.

При достаточной глубине размещения защитные свойства пород в совокупности с другими специальными мероприятиями позволяют практически исключить отрицательное воздействие радиоактивных выбросов.

Также должны учитываться горное давление, внешние динамические и сейсмические воздействия. Строительство сооружений глубокого заложения (более 200–300 м от уровня поверхности) связано с повышением горного давления. Напряженное состояние горных пород формируется под влиянием сил гравитации, тектонических движений, гидродинамических и температурных факторов.

В кристаллических породах под влиянием тектонических сил возникают напряжения большие, чем создаваемые силами гравитации. Горизонтальные напряжения в скальных грунтах могут в несколько раз превышать вертикальные. Определенная ориентация подземных выработок в пространстве при проходке позволяет ослабить влияние повышенных горизонтальных напряжений.

Температура в горном массиве и ее изменение так же связана с глубиной. Геотермический градиент температур в скальных породах на каждые 100 м углубления в недра земли колеблется от 0,1 до 6 °С.

Глубина залегания и распространение подземных вод (обводненность грунтов) обуславливаются геологической структурой, тектоникой территории, глубиной распространения тектонических нарушений, составом и состоянием грунтов, режимом питания, транзита и разгрузки подземных вод.

Является закономерным уменьшение обводненности грунтов на больших глубинах. Интервалы глубин снижения водопритоков в зависимости от названных факторов значительно варьируют. В горнодобывающих районах страны отмечено, что максимальные водопритоки в горные выработки наблюдаются до глубины 150–200 м. Так как гражданские и промышленные подземные объекты в городах строятся в основном на глубинах до 100 м, они чаще попадают в зону наибольшей обводненности, что следует иметь в виду при строительстве.

В арктических районах с многолетней мерзлотой строительство подземных сооружений сопровождается оттаиванием или промерзанием грунтов в зависимости от расположения объекта в зоне сплошной, прерывистой или островной мерзлоты, от времени производства работ и от теплового режима эксплуатации сооружения [14].

С увеличением глубины строительства возрастает стоимость поддержания горных выработок. Повышение горного давления предопределяет необходимость применения бетонной крепи большей толщины, а также других видов крепи с увеличенными параметрами. В целом необходимо отметить, что для создания надежного защитного барьера из скальных горных пород (в зависимости от свойств пород) будет достаточно глубины до 100 м.

Форма и размеры выработок. Форма и размеры 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 (вчерне) кроме толщины крепи необходимо учитывать горно-геологические характеристики вмещающих пород. Форма поперечного сечения выработки выбирается в зависимости от устойчивости пород, срока службы и назначения выработки.

Форма выработки влияет на ее устойчивость и выбирается в зависимости от величины и направления давления горных пород. Также учитываются физико-механические свойства горных пород, их назначение, свойства материала крепи. Наиболее распространенной формой поперечного сечения вертикальных выработок является круглая. Для горизонтальных выработок, как правило, принимается сводчатая форма поперечного сечения с вертикальными боковыми стенками. На рис. 5.7 показана схема формирования геометрических параметров для всех типов горизонтальных выработок и камер.

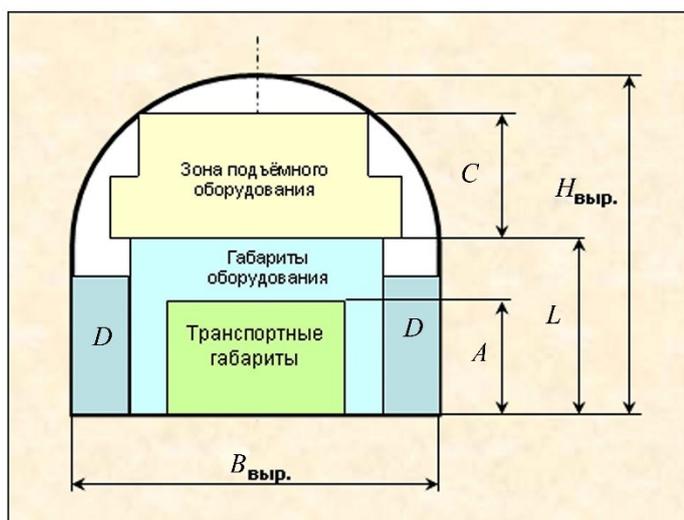


Рис. 5.7. Принципиальная схема формирования геометрических параметров выработки

Размеры поперечного сечения выработки определяются габаритами основного (L), подъемного (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.

Минимальные площади поперечного сечения, зазоры, ширина проходов для людей устанавливаются действующими правилами безопасности. В горно-капитальных выработках, где по технологии работ постоянно используется погрузочно-доставочные машины с двигателями внутреннего сгорания и есть необходимость в постоянном перемещении людей при работе этих машин, проезжая часть выработки должна быть отделена от прохода для людей, а также от зоны действия других самоходных транспортных средств поднятием пешеходной дорожки. Во всех выработках, в которых эксплуатируются самоходные транспортные средства, ширина проходов для людей регламентируется.

В выработках с односторонним движением, по которым происходит движение самоходных транспортных средств, ширина проезжей части должна превышать ширину транспортного средства не менее чем на 1,2 м. В доставочных выработках, предназначенных для доставки оборудования, материалов и людей (в машинах), при скоростях движения свыше 10 км/ч предусматриваются следующие зазоры (D): по 600 мм с каждой стороны при исключении случаев передвижения людей пешком; 1200 мм со стороны прохода для людей и 500 мм с другой стороны, если передвижение людей пешком не исключается [14, 15].

5.2.2. Оценка конструктивных и компоновочных решений подземных комплексов АСММ

Анализ массогабаритных параметров реакторных установок для подземных комплексов АСММ. Архитектура подземных комплексов для атомных станций малой мощности должна способствовать решению функциональных задач на основе обеспечения комплексной безопасности.

Конструктивные решения должны, прежде всего, обеспечить:

- длительную устойчивость подземных сооружений и безопасность работы АСММ в течение всего срока эксплуатации;
- приемлемые условия для эксплуатации, ревизии, ремонта, монтажа и демонтажа оборудования;
- необходимые санитарно-гигиенические нормативы;
- безопасность для окружающей среды и обслуживающего персонала в штатном режиме;
- радиационную и ядерную безопасность;
- пожарную безопасность;
- возможность реализации проекта, в т. ч. его архитектурно-конструктивной части, современными доступными технологическими решениями;
- высокие технико-экономические показатели АСММ, к числу которых в первую очередь относятся удельные капиталовложения (руб/кВт), объем строительно-монтажных работ, себестоимость вырабатываемой энергии (руб/кВт-ч), срок окупаемости капиталовложений;
- возможность модернизации по завершении проектного срока службы или вывод из эксплуатации с консервацией или с полным демонтажем оборудования [6, 16].

Конструктивно-компоновочные решения подземных станций связаны прежде всего с ее целевым назначением, типом реактора, мощностью и количеством устанавливаемых энергоблоков и компоновкой реакторных установок, а также особенностью технологических схем работы всего комплекса.

Подземная атомная станция малой мощности состоит из определенного набора рабочего оборудования, которое размещается в подземных горных выработках различных форм и геометрических размеров. Можно выделить основные группы оборудования, которые являются определяющими для обоснования архитектуры комплекса: реактор и его внутренние системы защиты и управления, турбина, генератор с системами управления, пункты хранения и размещения радиоактивных материалов, системы локализации аварийных выбросов, вспомогательное оборудование.

Подземная АСММ рассматривается как комплексное предприятие, в котором, помимо основного инженерно-технического оборудования, возможно размещение хранилища свежего и отработавшего ядерного топлива, а при необходимости — и РАО. Все работы с радиоактивными материалами ведутся в подземных помещениях.

В хранилищах свежего и отработавшего ядерного топлива обеспечивается возможность полной выгрузки активной зоны в любое время, а также работа системы отвода остаточного тепла и защиты от выхода радиоактивных веществ в окружающую среду сверх установленных проектом пределов [17]. В зависимости от используемого типа реактора возле него могут размещаться бассейн выдержки и перегрузки топлива.

Хранение РАО в подземном комплексе АСММ позволит исключить строительство отдельного хранилища в процессе эксплуатации и снизить транспортные расходы. Например, за весь срок службы АС накапливаемый объем всех категорий РАО (твердых, жидких, фильтрующих материалов) для реакторных установок различного типа составляет от 500 до 3500 м³.

На подземных станциях роль дополнительного эффективного барьера выполняют система крепи и различные защитные оболочки. На всех выработках доступа, транспортных и коммуникационных выработках устанавливаются герметизирующие устройства. Герметизирующие устройства относятся к механизмам многократного действия и снабжаются как автоматическим, так и ручным управлением. Аварийные эвакуационные проходы при нормальной эксплуатации герметично закрыты [17].

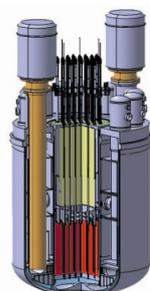
Компоновка оборудования. Компоновку оборудования подземного комплекса ориентируют на функционально-технологические принципы работы, направленные на максимальное сближение объектов, имеющих при эксплуатации высокое давление и температуру (реакторы, парогенераторы, главные циркуляционные насосы). Однако при проектировании отдается предпочтение отдельному размещению оборудования реакторной группы.

С учетом размеров и функционального назначения оборудования формируют основные геометрические параметры выработок подземного комплекса АСММ. Различные типы реакторов отличаются по мощности и конструкции и имеют свои транспортные и установочные размеры оборудования. Логистика формирования крупных модулей оборудования на заводах-изготовителях базируется на возможности их транспортирования морским, железнодорожным способом или автотранспортом. При заводской сборке предпочтение отдается крупным модулям, которые транспортируются на место установки в подземной выработке выбранным транспортом. Для обоснования строительных параметров подземных выработок рассмотрим основные массогабаритные характеристики реакторов различной мощности в следующем диапазоне: 1–3, 5–15, 20–50, 50–100 МВт. В диапазоне мощностей 1–3 МВт рассмотрены разработанные блочно-транспортные самоходные установки.

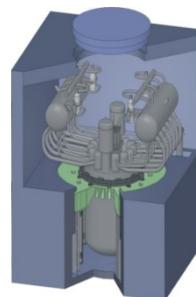
Диапазон мощности до 100 МВт. На рис. 5.8 показан комплект моноблока реакторной установки СВБР-100. Габариты моноблока (диаметр×высота) — 4,53×7,6 м, масса — 270 т.

Оценка ориентировочных размеров реакторного и турбинного отделений АСММ с реакторной установкой СВБР-100 выполнялась на основе информации об архитектурно-строительных решениях для опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой данного типа [18, 19].

Диапазон мощности 20–50 МВт. В России разработан ряд реакторных установок в этом диапазоне электрической мощности. На рис. 5.9 и 5.10 показаны комплекты основного оборудования и некоторые транспортно-габаритные характеристики реакторных установок КЛТ-40С и РИТМ-200.

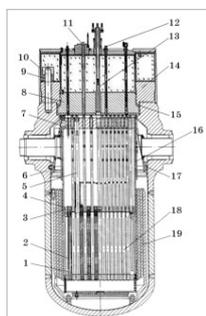


Моноблок

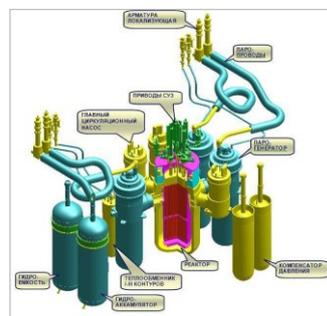


Реакторная установка в защитном блоке

Рис. 5.8. Комплект моноблока и реакторная установка СВБР-100 [18, 19]



Реакторная установка мощностью 35–38 МВт

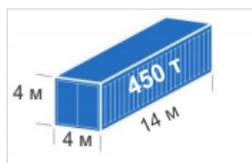


Габаритные размеры (длина×ширина×высота) 9×8×12 м, масса агрегата — 200 т

Рис. 5.9. Комплект оборудования с реакторной установкой КЛТ-40С [20]



Габариты РУ: 6×6×15 м, масса — 150–200 т, мощность — 45 МВт



Транспортный модуль



Транспортировка

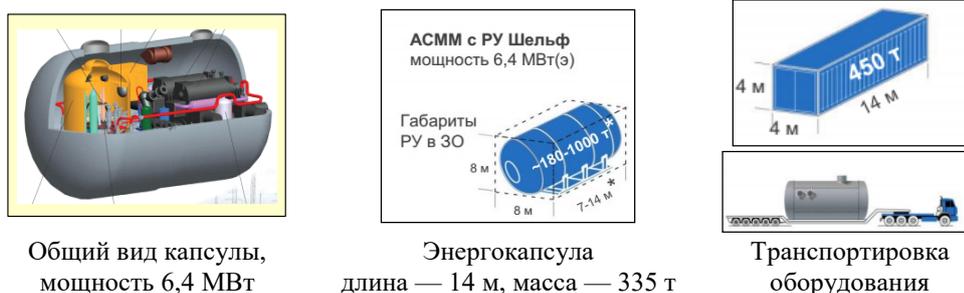
Рис. 5.10. Комплект оборудования АСММ с РУ РИТМ-200 [20]

Очевидно, что условный диаметр транспортных выработок и выработок вскрытия для этих установок будет находиться в диапазоне 7–9 м. В качестве

выработок вскрытия технически и экономически целесообразно использовать горизонтальные (штольня, тоннель) или наклонные выработки (уклон).

Диапазон мощностей 5–15 МВт. Поперечные размеры крупных модулей для АСММ в диапазоне мощности 5–15 МВт находятся на уровне 5–8 м, что предопределяет условный диаметр транспортных выработок 6–9 м. Основной комплект оборудования АСММ с реакторной установкой «Шельф» показан на рис. 5.11, с реакторной установкой АБВ-6 — на рис. 5.12.

В основной транспортируемый модуль (капсула) установки «Шельф» входят: РУ в защитной оболочке, турбинная установка, резервный дизель-генератор, стандартизированное оборудование.

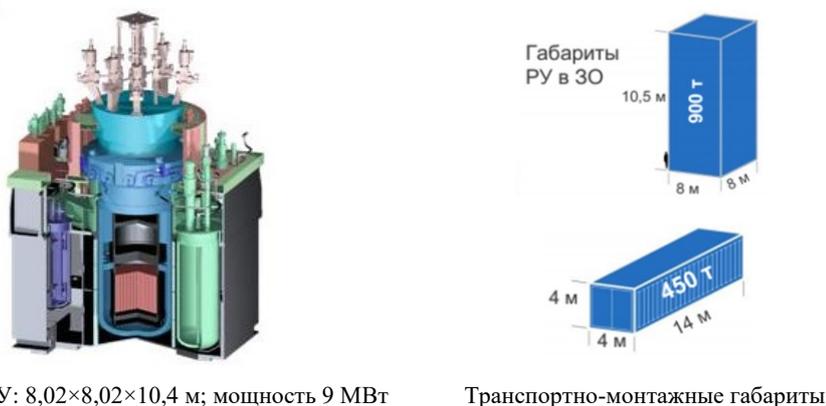


Общий вид капсулы, мощность 6,4 МВт

Энергокапсула
длина — 14 м, масса — 335 т

Транспортировка
оборудования

Рис. 5.11. Основной комплект оборудования АСММ с реакторной установкой «Шельф» [21]



Габариты РУ: 8,02×8,02×10,4 м; мощность 9 МВт

Транспортно-монтажные габариты

Рис. 5.12. Комплект оборудования АСММ с реакторной установкой АБВ-6 [21]

Комплект оборудования АСММ с реакторной установкой «УниTERM» показан на рис. 5.13, а на рис. 5.14 — блочно-транспортабельной АТЭС малой мощности «Ангстрем».

В диапазоне мощностей реакторных установок 5–15 МВт наименьший диаметр, равный 5 м, имеет установка «УниTERM», что позволяет для доставки ее в подземное пространство использовать вертикальную или горизонтальную выработку диаметром 6,5–7 м. Блочно-транспортабельная установка «Ангстрем» может транспортироваться к месту установки, а также может оставаться

на железнодорожной колесной базе в процессе эксплуатации. Для модульных установок малой мощности с реакторами «Шельф» и «Ангстрем» характерна только горизонтальная постановка — и при эксплуатации, и при транспортировке.



Рис. 5.13. Комплект оборудования АСММ с реакторной установкой «УниTERM» [21]



Рис. 5.14. Блочнo-транспoртабельная АТЭЦ малoй мoщнoсти «Ангстрем» [22] (дoстaвкa жeлeзнoдoрoжнoм, aвтoмoбильнoм или вoднoм видeм тpaнспoртa)

Диапазон мощностей 1–3 МВт. Для реакторных установок мощностью 1–3 МВт разработаны блочно-транспoртабельные (тягач с прицепом) и полностью самоходные установки на гусеничном ходу. Диапазон мощностей данных реакторных установок составляет 1–2 МВт, габаритные размеры 4×5,5×6 м. Блочнo-транспoртабельные и самоходные атомные станции малoй мoщнoсти представлeны на рис. 5.15 и 5.16. Дoстaвкa их к мeстy устaнoвки в пoдзeмнoм кoмплeксe вoзмoжнa тoлькo пo гoризoнтальным вьрaбoткaм, пoпeрeчнe размеры тpaнспoртнoй вьрaбoтки в свeту бyдyт сoстaвлять 5×7 м.



Рис. 5.15. Блочнo-транспoртабельная атомная станция малoй мoщнoсти [22]

Необходимо отметить, что в настоящее время габариты реакторных установок, а также их единичная масса изменяются в широком диапазоне и напрямую не зависят от энергетических параметров. Это связано с использованием



Рис. 5.16. Самоходная АСММ «ТЭС-3» (четыре самоходных модуля) [22]. Вес единичного самоходного модуля около 90 т, электрическая мощность — 1,5–2 МВт

разработчиками технологий проектных решений, позволяющих оптимизировать габариты и массу реакторных установок в сторону уменьшения.

Оценка параметров подземных выработок. При проектировании подземной АСММ компоновка комплекса и планировка выработок отличается большим разнообразием. В данной работе рассматривается размещение основного оборудования в подземном пространстве без учета вспомогательных служб на дневной поверхности. В зависимости от типа реакторной установки, ее мощности и габаритных размеров будут определяться общие геометрические параметры всех

выработок и архитектура подземного комплекса. Доставка оборудования и обслуживание внутри подземного комплекса будет осуществляться через горизонтальные транспортные или вертикальные выработки. Размещение реакторной установки и основного оборудования осуществляется в камерных выработках различного назначения.

Подача свежего воздуха и отвод отработанного воздуха предусматривается через вентиляционные выработки (вертикальные и горизонтальные), а также воздушные каналы и трубопроводы. Отдельно от основных модулей располагают камеры вспомогательных систем, например: пункт управления, водоочистки, генераторной, каналы (скважины) и галереи для размещения кабелей и трубопроводов. Для прокладки трубопроводов и кабелей на подземной станции, с учетом их большого количества, используются изолированные отсеки с разделением по определенным категориям. Для этой цели используют отдельные кабельные ходки или оборудуют отдельную выработку (скважину), разделенную перегородками.

Ориентировочная оценка геометрических параметров подземных выработок для размещения основного оборудования АСММ проводилась на основе сравнительного анализа проектов компоновки АС наземного размещения, которые имеют несколько завышенные значения для подземных комплексов.

Параметры подземных выработок реакторного и турбинного отделений можно дифференцированно сопоставить с аналогичными проектами для поверхностных комплексов. Размеры выработок под размещение оборудования типового проектирования для различных энергетических установок также могут изменяться в зависимости от конкретной модификации блока реакторной установки.

Ориентировочные оценки геометрических параметров выработок подземного комплекса АСММ для различных типов реакторов представлены в табл. 5.2. Протяженность вскрывающих, транспортных и вентиляционных выработок будет зависеть от непосредственной полной компоновки подземного комплекса, модулей для РО в зависимости от количества размещенных в нем реакторов.

Ориентировочные оценки геометрических параметров горных выработок
подземного комплекса для различных типов реакторов

Показатели	Мощность, МВт			
	50–100	20–50	5–15	1–3
Тип установки (типоразмер)	СВБР-100	КЛТ 40С; РИТМ-200	«Униформ»; «Шельф»; СВБР-10; АБВ-6	Блочно-транспортабельные, «ТЭС-3»
Выработки вскрытия	Штольня 5×6 м; 8×9 м; вертикальный ствол $D = 6$ м	Штольня 5×6 м; 8×9 м; вертикальный ствол $D = 8$ м	Штольня 5×6 м; 8×9 м; вертикальный ствол $D = 6$ м	Штольня 5×(6–7) м
Транспортные выработки	Галерея 5×(6–7) м	Галерея 8×9 м; 5×6 м	Галерея 8×9 м; 5×6 м	Галерея 5×(6–7) м
Вентиляционные выработки	Штольня 3×3 м; вертикальный восстающий $D = 2,5$ м	Штольня 3×3 м; вертикальный восстающий $D = 2,5$ м	Штольня 3×3 м; скважина $D = 0,5$ м	Штольня 3×3 м; скважина $D = 0,25$ м
Камера реактора	Двухкамерная $D = 12$ м; $H = 20–24$ м $S = 60–80$ м ² ; $L = 40–60$ м	Двухкамерная $D = 12–15$ м; $H = 20–22$ м $S = 45–60$ м ² ; $L = 40–60$ м	Однокамерная $S = 30–40$ м ² ; $L = 20–40$ м	Однокамерная $S = 20–30$ м ² ; $L = 20–30$ м
Турбинное отделение	$S = 80–120$ м ² ; $L = 60–100$ м	$S = 120–180$ м ² ; $L = 50–100$ м; $S = 40–50$ м ² ; $L = 40–60$ м	$S = 40–100$ м ² ; $L = 40–50$ м; $S = 30$ м ² ; $L = 20$ м	$S = 30$ м ² ; $L = 20–40$ м
Вспомогательная камера (1–3 шт.)	$S = 25–40$ м ² ; $L = 30–50$ м	$S = 25–40$ м ² ; $L = 30–50$ м	$S = 25–40$ м ² ; $L = 20–40$ м	$S = 20–30$ м ² ; $L = 10–20$ м

Помещения для персонала, служб дозиметрического контроля и контрольно-измерительной аппаратуры, как правило, компоуются в отдельный блок. Реакторный и турбинный блоки могут быть размещены в одной протяженной камерной выработке или в нескольких камерных выработках относительно меньшего размера. В этом случае одиночная камера должна быть достаточно протяженной или высокой. Учитывая, что помещения подземной станции разделяются на обслуживаемые и необслуживаемые зоны, раздельное размещение вспомогательного оборудования в нескольких камерных выработках считается более целесообразным.

5.2.3. Анализ компоновочных решений подземных комплексов АСММ

Анализ компоновочных схем. Все выработки подземного комплекса связаны с целевым назначением и ориентированы по функционально-технологическому принципу работы. Оптимальная компоновка подземной АСММ позволяет обеспечить длительную устойчивость подземных сооружений в течение всего срока эксплуатации. Из мировой практики проектирования подземных комплексов можно отметить следующие конструктивные решения. Это расположение группы камерных выработок: по кольцевому принципу; перпендикулярно направлению вскрытия горизонта; вдоль основной транспортной выработки; в нескольких параллельных протяженных камерах; на различных вертикальных уровнях — и комбинированное расположение группы камер относительно вскрывающих выработок. Рассмотрим основные компоновочные схемы камерных выработок под размещение реакторного отделения для различных групп.

Схемы с последовательным размещением основных камерных выработок характеризуются простотой компоновочных решений, небольшим удельным объемом горно-капитальных работ, особенно при тупиковой схеме. Предпочтительнее использовать данную схему при вскрытии подземного комплекса штольной, а также для РУ небольшой мощности (1–6 МВт). В качестве недостатков необходимо отметить отсутствие непосредственного запасного выхода на дневную поверхность при тупиковом расположении транспортных выработок.

Схемы с параллельным расположением камерных выработок характеризуются простотой компоновочных решений, небольшим удельным объемом горно-капитальных работ. Как правило, устраивается кольцевая транспортная схема с раздельным расположением реакторных установок в отдельных камерных выработках. Возможность такой компоновки может быть предпочтительнее с размещением двух и более реакторов мощностью 1–15 МВт.

Схемы со смешанной компоновкой и единичной протяженной (основной) камерной выработкой характеризуются высокой концентрацией оборудования в главной камерной выработке. Для этого строится одна или несколько протяженных выработок 60–100 м длиной с увеличенным поперечным сечением 80–150 м², в которых располагается основное и вспомогательное оборудование станции. Основной объем горно-капитальных работ связан со строительством главных камерных выработок. Как правило,

устраивается тупиковая транспортная схема с размещением реакторных установок в одной камерной выработке. Примыкание камер обслуживания под углом 90° позволяет более компактно расположить вспомогательное оборудование, однако создает дополнительные трудности с устойчивостью сопряжений выработок. Возможность такой компоновки предпочтительнее при размещении двух и более реакторов мощностью 20–100 МВт. В данных схемах возможно ориентировать камерные выработки относительно главных напряжений.

Схемы со смешанной компоновкой главных камерных выработок и кольцевой транспортной схемой характеризуются высокой концентрацией оборудования в отдельных камерных выработках, которых может быть несколько, по количеству реакторных установок. Камерные выработки, в которых располагается основное и вспомогательное оборудование станции, имеют длину 40–100 м и площадь поперечного сечения 80–100 м². Основной объем горно-капитальных работ связан со строительством главных камерных выработок.

Кольцевая транспортная схема представляется более удобной и в случае аварийной ситуации является более безопасной, однако сквозная транспортная схема не является предпочтительной. В данных схемах трудно обоснованно сориентировать камерные выработки относительно главных напряжений. Рационально использование данных компоновок при благоприятных геомеханических условиях. С точки зрения геомеханики пересечение основных камер с транспортными выработками является ослабляющим фактором устойчивости, также в местах пересечений потребуется обустройство дополнительных герметичных проходов. Однако перпендикулярное примыкание камер обслуживания позволяет более компактно разместить вспомогательное оборудование при размещении двух и более реакторов.

Методический подход. Научный подход к проектированию перспективных компоновок подземных комплексов, как сложных систем, основан на применении методов структурно-параметрических исследований, под ним понимается определение такой структуры проектных параметров, которая соответствует техническому заданию и обеспечивает экстремум выбранного критерия качества.

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. На начальных этапах проектирования с большой неопределенностью исходных данных и знаний, необходимых для разработки, и слабой структуризацией рассматриваемой предметной области требуется решение задач структурно-параметрического синтеза.

Одним из основных этапов проектирования систем являются исследования по выбору и обоснованию критерия качества (оптимальности) проектных решений, который рассматривается в качестве объектного показателя, позволяющего определить степень соответствия системы заданным показателям. При разработке иерархии критериев и увязке их

в единую систему показателей авторы исходили из следующих основных требований к ним: критерии должны соответствовать целям и задачам и наиболее полно учитывать факторы, определяющие облик подземного комплекса и его подсистем [6].

Инженерная задача имеет большое число решений и представляет собой циклический, многошаговый процесс последовательного приближения. При отсутствии достоверного предметного описания и необходимой математической формализации АСММ как объекта проектирования допустимо использование метода экспертных оценок [23, 24]. Из большого количества разнообразных проектных решений матрицы были представлены наиболее характерными схемами компоновок, которые объединены в группы по принципу взаимного расположения основных камерных выработок (рис. 5.17).

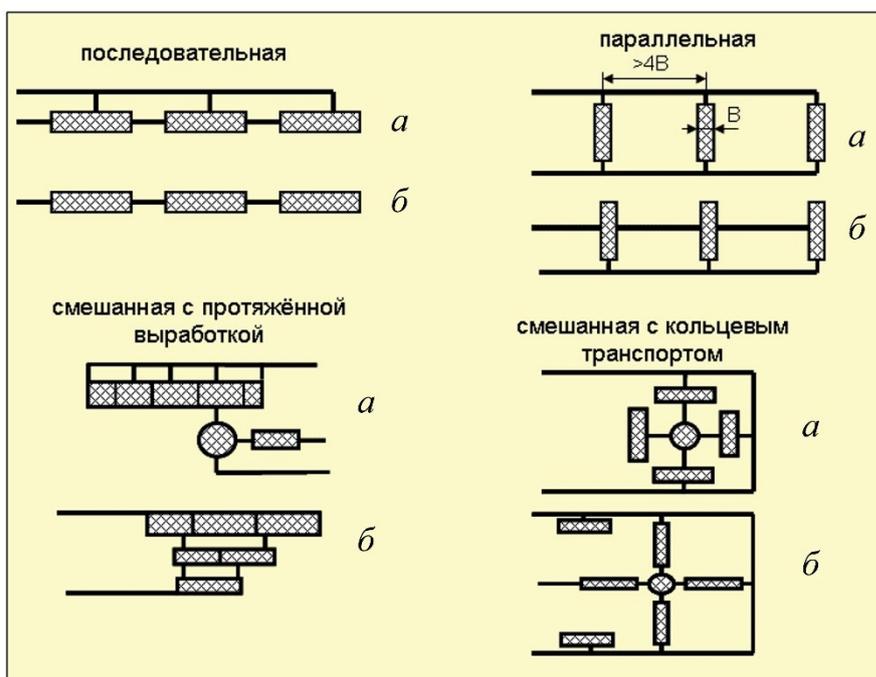


Рис. 5.17. Основные группы схем с расположением камерных выработок:
a, б — варианты в группе

Компоновочные решения оценивались на основе 5-балльной шкалы по семи критериям с сопоставимым удельным весом: геомеханические условия; аварийная эвакуация; пересечения транспортных и камерных выработок; транспортные схемы; удельный объем горных работ; размещение основного оборудования; решения по вентиляции [25]. Результаты экспертной оценки рациональности компоновки подземного комплекса для различных групп представлены в табл. 5.3.

В обобщенном виде результаты оценки рациональности компоновки подземного комплекса для различных групп по средним значениям приведены на рис. 5.18.

Таблица 5.3

Оценка рациональности компоновочных решений в баллах

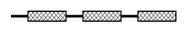
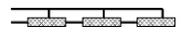
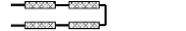
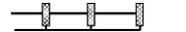
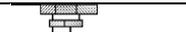
Схема компоновки	Показатели оценки							Всего
	Аварийная эвакуация	Геомеханические условия эксплуатации	Пересечения транспортных и камерных выработок	Организация транспортных схем	Удельный объем горно-капитальных работ	Размещение основного оборудования	Решения по вентиляции	
Последовательная схема								
	1	4	3	1	5	2	2	18
	4	3	4	3	4	4	3	25
	2	4	4	2	5	3	2	22
Среднее значение 21,6								
Параллельная схема								
	5	4	4	4	4	4	4	29
	3	3	3	5	4	5	3	26
	2	4	4	3	5	3	3	24
Среднее значение 26,3								
Смешанная схема с протяженной камерной выработкой								
	4	4	5	4	5	5	3	30
	4	3	5	4	5	5	3	29
	4	3	5	3	5	5	3	28
Среднее значение 29								
Смешанная схема с кольцевым транспортом								
	5	5	3	5	4	5	4	31
	5	4	3	5	4	5	4	30
	5	4	3	4	4	4	4	28
Среднее значение 29,6								



Рис. 5.18. Оценка рациональности компоновки подземного комплекса для различных групп

Таким образом, оценка основных компоновочных схем показала предпочтительность применения смешанного расположения основных камерных выработок и их компоновку по функционально-технологическому принципу работы, которые характеризуются высокой концентрацией оборудования и представляются наиболее безопасными. Наименьшие значения в баллах имеют схемы с последовательным и параллельным расположением камер. Расширение представлений архитектуры подземного комплекса способствует наиболее обоснованному принятию схем конструктивно-компоновочных решений для различных реакторных групп.

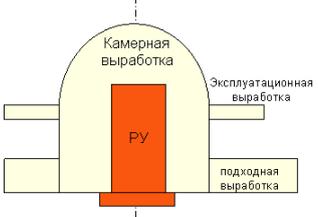
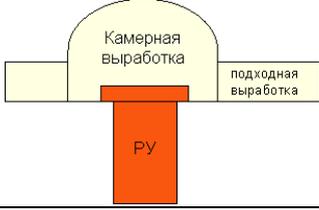
Конструкция реакторных выработок. Конструкция реакторной камеры непосредственно связана: с типом реактора и его габаритами; особенностью конструктивно-компоновочных решений основного оборудования, в первую очередь, турбоагрегата, конденсатора и некоторых других; способом его компоновки и технологическими решениями по обеспечению радиационной и ядерной безопасности. Для различных типов реакторных установок будет своя структура эксплуатационных служб и объем служебных помещений. При размещении на подземной АС нескольких энергоблоков каждый из них компокуется отдельно, чтобы не допустить возникновения каналов передачи аварии с одного блока на другой. В табл. 5.4 представлены основные принципы расположения реакторных установок в зависимости от их мощности и расположения относительно уровня почвы выработки.

Реакторы в диапазоне мощности от 20–100 МВт располагают, как правило, в вертикальной выработке большого поперечного сечения на почве выработки или полностью заглубленной. Реакторное помещение при таком расположении реакторной установки представляет собой вертикальную

цилиндрическую оболочку с отдельным размещением оборудования реакторной группы. Для выработок (камер) горизонтальной направленности характерны меньшие мощности реакторов (менее 20 МВт).

Таблица 5.4

Основные принципы расположения реакторных установок в зависимости от их мощности и уровня почвы выработки

Показатели расположения РУ	Компоновочная схема	Характеристика
На почве камерной выработки с увеличенной высотой камеры		Расположение РУ выше уровня почвы камерной выработки увеличенной высоты. Вспомогательные выработки располагаются на разных высотных отметках
Полностью заглублена в почве камерной выработки		Расположение РУ ниже уровня почвы камерной выработки, в отдельной вертикальной цилиндрической камере
Частично заглублена на почве основной камерной выработки		Расположение реакторной установки в почве камеры с подходными выработками, находящимися на одном уровне
На почве горизонтальной выработки		Размещение РУ на почве в горизонтальной выработке (камере)

Можно выделить два основных типа расположения реактора в модуле: с вертикальным и горизонтальным расположением главных осей выработки.

Например, при заглублении реактора в почве камерной выработки в конструкцию входит главная камерная выработка с отдельными транспортными выработками. На уровне подошвы главной камерной выработки располагается заглубленная в породный массив вертикальная камера для размещения реактора.

Принципиальная схема компоновки модуля с двумя реакторами в вертикальных выработках показана на рис. 5.19. Машинный зал располагается в отдельной (смежной) камерной выработке, примыкающей к модулю для реактора.

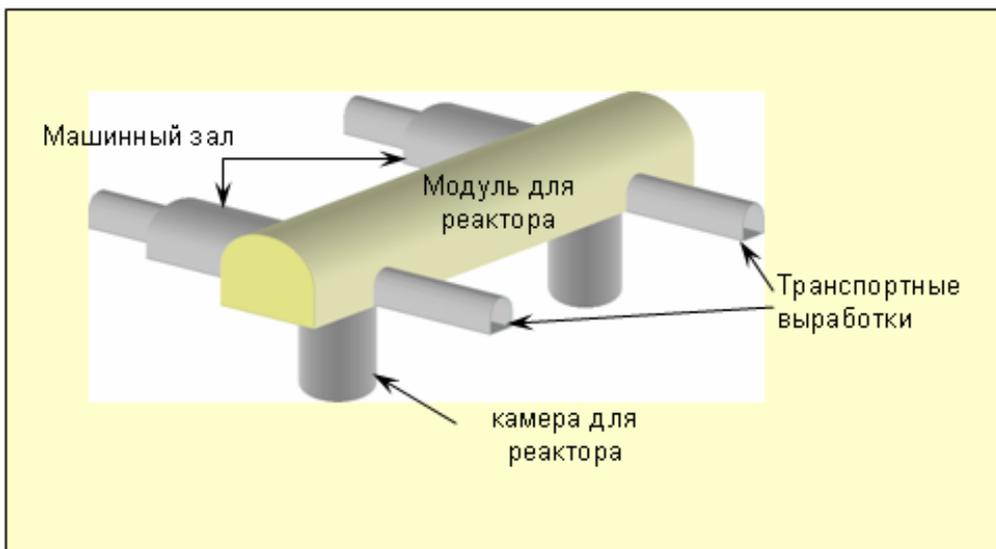


Рис. 5.19. Принципиальная схема компоновки модулей с заглубленными камерами для двух реакторов

Для монтажа РУ мощностью до 10 МВт предпочтительнее применение модульных блоков заводской сборки с расположением их в отдельных горизонтальных выработках (камерах). Так, реакторная интегральная установка «УниTERM» является модульной и устанавливается в отдельной горизонтальной выработке. В конструкции модуля предусмотрена воздухоохлаждающая система автономного отвода мощности и все оборудование размещено в прочном контейнере, пассивно локализирующем внутри себя все последствия аварии.

Принципиальная схема размещения модуля реакторной установки с двумя отдельными реакторными установками малой мощности (3–6 МВт) в горизонтальной выработке показана на рис. 5.20.

Компоновочная схема конструкции для размещения реакторных установок в горизонтальной выработке, в отличие от вертикальных выработок, более простая. Все выработки находятся на уровне одного горизонта, транспортные выработки расположены параллельно друг другу и имеют кольцевое соединение в плане.

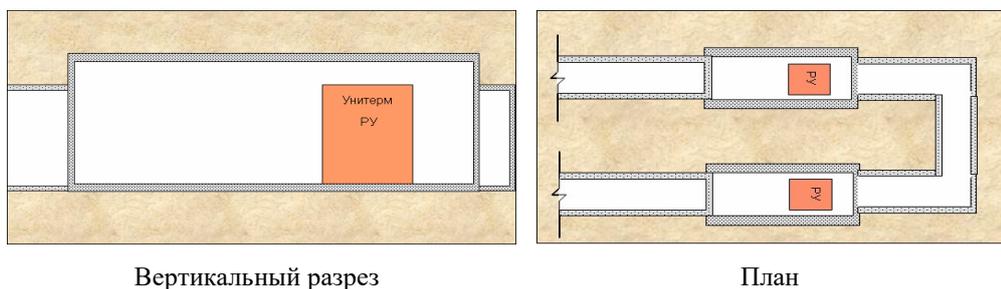


Рис. 5.20. Принципиальная схема размещения модуля реакторной установки (3–6 МВт) в горизонтальной выработке

5.3. Методические подходы для обоснования технологий строительства подземных АСММ в арктических условиях

5.3.1. Формирование методических принципов в области проектирования и технологии строительства подземных комплексов АСММ

Методология создания подземных комплексов АСММ базируется на комплексной оценке безопасных условий строительства и эксплуатации, использовании несущих свойств скального массива и единого архитектурного решения, обеспечивающих длительную динамическую устойчивость и долговечность горных выработок и строительных конструкций.

В основе принципов проектирования и строительства подземных объектов АСММ лежит единая концепция, которая реализуется как в процессе проектирования, так и на стадии осуществления проектных решений [26].

Создание подземных комплексов для энергетических установок малой мощности, особенно в арктических регионах, обуславливает решение ряда задач, связанных с применением безопасных технологий строительства. Технология строительства подземных выработок для размещения подземного комплекса учитывает опыт сооружений аналогичных вскрывающих, транспортных и камерных выработок в горнорудном строительстве, тоннелестроении и строительстве объектов специального назначения.

Комплексный подход базируется на взаимосвязанных компонентах совершенствования организации управления, который включает проведение инженерно-геологических изысканий, проектирование, использование и разработку высокоэффективных инженерных технических решений и технологий при активном научном сопровождении строительства.

Наглядным примером комплексного подхода является то, что в настоящее время подземное строительство рассматривается как составная часть природно-технической геосистемы «*породный массив — подземное сооружение — технология подземного строительства — окружающая среда*» [27, 28].

При функционировании подземной АСММ возникает сложная взаимосвязь между строительными, технологическими, эксплуатационными и экологическими аспектами. В этой связи компоненты взаимодействия выделяют в систему, в которую включены природные, технологические и технические связи, обуславливающие нормальную работу подземного сооружения на всех этапах жизненного цикла с позиций приемлемого риска.

Таковыми взаимовлияющими компонентами, образующими сложную природно-техническую геосистему, являются следующие составляющие: породный массив, собственно подземное сооружение, технология его строительства и эксплуатации, окружающая среда.

При формировании такой системы, направленной на создание большого числа решений, главной задачей является формирование типовых модулей решений в соответствии с многовариантными условиями строительства. Возникает задача учета показателей различного характера: от горно-геологических, технологических, геомеханических и экологических до социально-экономических и санитарно-гигиенических.

С этих позиций подготовка исходных данных для проектирования и строительства подземного сооружения заключается в выявлении соответствия между характеристиками элементов системы, а также оценке их взаимовлияния и взаимосвязей.

Проектирование основывается на том, что любое находящееся в стадии строительства подземное сооружение рассматривается как один из составляющих элементов природно-технической геосистемы, а также на изучении взаимодействия подземного сооружения с окружающей средой [29, 30]. Причем технология строительства во многом определяет характер взаимодействия подземного объекта и окружающего породного массива на период всего жизненного цикла сооружения. Особенно это характерно для объектов с длительным сроком функционирования.

Взаимодействие элементов природной геосистемы можно представить в виде следующих блоков, приведенных на рис. 5.21.

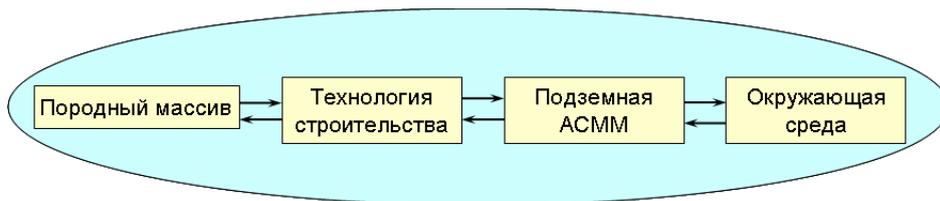


Рис. 5.21. Взаимодействие природной геосистемы при строительстве

Блок «Подземная АСММ» — описывает функциональное назначение подземных сооружений и формирует требования к характеристикам вмещающих пород.

Блок «Породный массив» — формирует исходную информацию по вмещающему массиву и предопределяет требования к технологии строительства. В период строительства подземного сооружения на взаимодействие подземного сооружения и породного массива особенно существенное влияние оказывает технология строительства.

Блок «Технология строительства» — описывает варианты технологических решений, которые могут быть использованы для удовлетворения требований предыдущих блоков.

Блок «Окружающая среда» — формирует основные требования и устанавливает ограничения при взаимодействии всех блоков.

Сформированная таким образом система включает элементы, состояние которых описывается разномасштабными и разноуровневыми характеристиками. С этих позиций подготовка исходных данных для проектирования строительства подземного сооружения заключается в выявлении соответствия между характеристиками элементов системы, а также оценке их взаимовлияния и взаимосвязей.

При строительстве важная роль отводится необходимости научного сопровождения на стадии инженерных изысканий и на всех этапах производства строительства. Получение новых данных о массиве в процессе ведения горных работ позволяет оперативно изменять старое проектное решение и принять новое более эффективное техническое решение.

Определяющим для строительства является горно-геологическая характеристика среды: геология и гидрогеология участка, геохимия, напряженное состояние и сейсмичность. При изучении массива особое внимание уделяется выбору однородного блока, размеры которого соизмеримы с максимальными размерами подземного комплекса. Скальный массив всегда расчленен на крупные

блоки, которые вызваны региональными или другими тектоническими нарушениями. Нарушение сплошности массива возможно в результате развития трещин, поэтому важно еще на стадии принятия проектных решений определить элементы естественной нарушенности массива, его монолитность при различных технологических схемах ведения работ. По результатам инженерно-геологических изысканий и научных исследований составляется инженерно-геологическая модель массива пород.

Модель представляет собой систематизированное масштабное представление о процессах и явлениях, которые протекают в геологической среде под влиянием инженерной деятельности. В модели находят отражение изменение основных, наиболее существенных свойств массива горных пород. Главной целью построения модели является прогноз изменения свойств и состояния массива во времени и пространстве. Особую роль играет приконтурный слой в сооружениях, от нарушенности которого зависят методы крепления и связанные с этим расходы.

Решению задач автоматизации процесса проектирования строительства способствует имитационное моделирование на базе использования современных компьютерных программ. Это позволяет за короткий период времени проработать большой объем возможных технологических решений [31].

Риски при строительстве. Так как при строительстве и эксплуатации основная роль отводится безопасности всей системы, то одним из аспектов при исследовании характера развития рискованных ситуаций является прогнозирование рисков на всех стадиях жизненного цикла подземного сооружения. Основные типы рисков при строительстве подземной АСММ показаны на рис. 5.22.



Рис. 5.22. Основные типы рисков при строительстве подземной АСММ

В целом при строительстве подземной АСММ преимущественными типами риска являются строительный и экологический, которые представляют наибольшую опасность.

Коммерческий и экономический риски в данной работе не рассматриваются. При выборе технологий строительства структура экологического риска выбираемой технологии включает деление риска по трем категориям: низкий, риск средней тяжести и высокий.

На стадии строительства происходит техногенное воздействие на компоненты природы, связанные с формированием строительной площадки, процессами подготовки к горнопроходческим работам и непосредственно к строительству подземного сооружения. Стадия строительства характеризуется некоторым условным максимумом техногенного воздействия.

В большинстве стран мирового сообщества в настоящее время принята концепция *«приемлемого риска»*, позволяющая использовать принцип предвидеть и предупредить. Особое внимание при анализе риска направлено на выявление слабых мест с точки зрения экологической безопасности и на разработку обоснованных рекомендаций по её обеспечению.

Для оценки степени опасности важны не только частота (или вероятность) ее появления, но и тяжесть последствий для окружающей среды. Чтобы сделать оценку количественной, в настоящее время применяют понятие риска, определяемого как произведение вероятности неблагоприятного события (аварии, катастрофы и т.д.) и ожидаемого ущерба в результате этого события.

5.3.2. Отдельные элементы технологии строительства подземных АСММ в условиях многолетней мерзлоты

Особенности подземного строительства в арктических условиях.

Отличительной особенностью строительства в условиях Арктики являются суровые климатические условия и наличие многолетней мерзлоты. Площадь арктического Севера на территории России включает районы Севера и Северо-Востока, где расположены значительные запасы углеводородного сырья и рудных залежей, широкое освоение которых предусмотрено в перспективных планах развития народного хозяйства страны.

Рассматриваемый регион, кроме распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 20–200 м, характеризуется низкими температурными показателями и длительной продолжительностью отопительного периода (7–9 месяцев). Геотемпературное поле зоны многолетней мерзлоты включает три области: гелиотермозону (сезонных колебаний температуры), криолитозону (постоянных отрицательных температур) и геотермозону (постоянных положительных температур).

Особенностью мерзлоты является то, что сезонные колебания температуры затухают на глубине 10–15 м, а на более низких глубинных отметках температура мерзлых пород изменяется в пределах около $\pm 0,1$ °С. Мерзлота практически непроницаема для жидкостей и газов.

Строительство подземных комплексов для размещения АСММ в скальных массивах российской Арктики в сложных инженерно-геологических условиях требует применения специальных методов ведения работ. Опыт подземного строительства в условиях многолетней мерзлоты показывает, что

существует дилемма: вечная мерзлота сохраняет устойчивость подземных выработок, но снижает эффективность строительства, так как возникают проблемы с выдержкой бетона, применением воды для бурения и т. д.

Разрабатываемые проекты должны быть направлены на сохранение первоначальных свойств породного массива. Причинами таяния грунта может являться высвобождение энергии во время взрывных работ, при вентиляции, а также теплообразование при работе тяжелой техники и другого тепловыделяющего оборудования.

Отечественный и зарубежный опыт промышленного освоения Севера позволяет утверждать, что технологические процессы, обеспечивающие безопасность и экономическую эффективность подземных горных работ в криолитозоне, в значительной мере связаны с тепловыми процессами и необходимостью научно обоснованного учета температурного фактора на всех стадиях горного производства.

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 [32, 33]:

- наличие многолетней мерзлоты;
- радиационное воздействие, способное изменять физико-механические свойства вмещающего массива 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.

Отрицательные и знакопеременные температуры горных пород и шахтного воздуха вызывают изменение физико-механических свойств мерзлых пород, смерзаемость отбитой горной массы, снижение надежности работы водопроводов и средств гидрообеспыливания, обледенение откаточных путей, растепление и снижение устойчивости горных выработок, переохлаждение горнорабочих при активной вентиляции, повышение производственного травматизма и т. д. Усложнение условий ведения подземных горных работ в условиях многолетней мерзлоты на 20–30 % повышает трудоемкость процессов горного производства. Отрицательная температура воздуха в горных выработках не обеспечивает комфортных условий труда горнорабочих и достижения ими максимальной производительности [34, 35].

В то же время стремление к повышению температуры воздуха в горных выработках до положительных значений ведет к оттаиванию мерзлых горных пород, возрастанию проявлений горного давления. Устойчивость обнажений и нагрузки на крепь выработок, вывалы и обрушения пород в них находятся в тесной связи с температурным фактором. При прогрессирующем оттаивании осадочных пород вокруг выработок возрастают (в 5 раз) затраты на их поддержание.

При ведении горных работ в районах многолетней мерзлоты и знакопеременных температур в массиве горных пород возникают тесные связи между тепловыми и механическими процессами. В этих случаях в полной мере проявляется влияние фазовых переходов жидкости (лед — вода) и связанное

с этим изменение физических свойств отдельных видов пород и массива в целом. Замерзание воды в горной породе ведет к изменению (увеличению) ее удельного объема и разрушению структурных элементов породы, расширению имеющихся пор, трещин и полостей, появлению дополнительных напряжений, способных вызвать динамические явления. С другой стороны, замещение жидкости льдом цементирует породы за счет сил сцепления по ледяным включениям.

На рудниках Севера получили распространение два типа теплового режима: «положительный» и «отрицательный». При первом режиме поддержание положительной температуры воздуха во всех выработках осуществляется путем его подогрева до температуры выше 5 °С перед подачей в выработки или дополнительного догрева на отдельных участках непосредственно в местах производства работ.

При втором тепловом режиме работы ведутся в холодный период года, что исключает оттаивание мерзлых пород. При переходе горных работ на глубокие горизонты «положительный» тепловой режим получил преимущественное распространение и осуществляется в соответствии с требованиями правил техники безопасности и охраны труда. Горные выработки, пройденные в многолетнемерзлых породах, оборудуют усиленной крепью, при необходимости с использованием гидроизоляции. Принципиальная схема структуры теплового режима подземной АСММ показана на рис. 5.23.



Рис. 5.23. Принципиальная схема структуры теплового режима подземной АСММ

В период строительства подземного комплекса АСММ целесообразно отказаться от поддержания режима положительных температур в подземных выработках. Это позволит успешно управлять свойствами и состоянием вмещающего породного массивов в процессе выемки породы в подземных сооружениях и возведения в них крепи и внутренних конструкций.

Технология строительства подземного комплекса. К технологии подземного строительства относятся методы строительства, охватывающие процессы проведения подземных горных выработок и подземных сооружений в массивах горных пород с учетом свойств этих массивов и назначения подземного сооружения. Подземное размещение АСММ, с учетом особенностей их функционального назначения и длительного срока эксплуатации, предполагает создание сложных инженерных систем, возводимых в горных породах.

В основе строительства подземных АСММ лежат действующие строительные нормы и правила [36–38], а также ряд требований к подземному строительству. Выбор места размещения сооружения следует производить с учетом устойчивости окружающих ее пород, а также рациональности общих компоновочных решений подземного комплекса.

Одной из задач при эксплуатации подземных сооружений АСММ в режиме как нормальной, так и аварийной эксплуатации является обеспечение их устойчивости. Помимо геомеханических нагрузок и сейсмического воздействия учитываются нагрузки от возможных гипотетических аварий на подземном комплексе в процессе эксплуатации и тепловые нагрузки.

Важным показателем при подземном размещении АСММ является оценка напряженного состояния приконтурного массива и строительных конструкций при тепловом воздействии. Неравномерность распределения температуры в нагреваемом поверхностном слое обуславливает образование термических напряжений в массиве [39].

Элементы сейсмостойкости АСММ должны проектироваться таким образом, чтобы отказ элементов низшей категории не привел к отказу в работе или разрушению элементов более высокой категории сейсмостойкости. Элементы АС I категории сейсмостойкости должны сохранять:

- способность выполнять функции, связанные с обеспечением безопасности АС во время и после прохождения землетрясения интенсивностью до МРЗ включительно;
- работоспособность при землетрясении интенсивностью до ПЗ включительно и после его прохождения.

Элементы АС II категории сейсмостойкости должны сохранять работоспособность после прохождения землетрясения интенсивностью до ПЗ включительно. В проекте АС должна быть предусмотрена проверка работоспособности элементов АС I и II категорий сейсмостойкости и технические меры по восстановлению их сейсмостойкости после прохождения землетрясений интенсивностью ПЗ.

Обеспечение динамической устойчивости подземного сооружения при сейсмическом и термодинамическом воздействии осуществляется за счет применения усиленных сейсмостойких конструкций. В выработках, сооружаемых в сейсмических районах с сейсмичностью свыше 7 баллов, следует предусматривать устройство деформационных швов в местах пересечения выработкой трещин, контактов между породами различной прочности, а также при примыкании железобетонных конструкций защитных оболочек к оболочкам других конструкций [40].

Расчетные нагрузки. Расчет конструкций на прочность должен проводиться при действии наиболее неблагоприятных сочетаний внутренних и внешних нагрузок, возникающих в особых режимах и при испытаниях внутренним давлением. При расчетах на длительную устойчивость конструкции проверяются на наиболее неблагоприятное сочетание всех нагрузок.

Технологические нагрузки должны учитываться в сочетаниях с сейсмическими [40, 41]. Нагрузки и воздействия на конструкции подземных сооружений I категории необходимо рассчитывать с учетом следующих особых воздействий:

- экстремальных температур;
- максимального расчетного землетрясения;
- максимальной проектной аварии;
- воздушной ударной волны.

Строительные конструкции и сооружения атомных станций следует рассчитывать на силовые воздействия по методу предельных состояний. Расчеты систем и элементов АС I категории сейсмостойкости на сейсмические воздействия должны быть выполнены при одновременном учете сейсмической нагрузки по трем пространственным компонентам. Для зданий и сооружений II категории сейсмостойкости допускается учет сейсмического воздействия по компонентам отдельно.

Горные выработки. Для улучшения условий поддержания и обеспечения рабочего состояния выработок следует располагать их в устойчивых породных массивах, а при необходимости применять специальные мероприятия:

- расположение выработок на расстояниях, исключающих их взаимное влияние;
- расположение выработок в предварительно разгруженной области массива;
- предварительное и/или последующее упрочнение массива пород;
- уменьшение концентрации напряжении за счет различных способов разгрузки массива.

Применение технологий предварительного укрепления ослабленных тектоническими и иными нарушениями породных массивов позволяет разрабатывать выработки сразу на полный профиль с поперечным сечением до 250 м², что способствует повышению темпов горнопроходческих работ в крупногабаритных сооружениях.

Для подземной АСММ должно быть предусмотрено создание и функционирование системы горного мониторинга за 6–12 месяцев до начала сооружения, а также в течение всего периода сооружения, эксплуатации и вывода из эксплуатации [41]. Санитарные правила предписывают, что все сооружения АС должны быть разделены на зоны:

- строгого режима, где возможно воздействие на персонал радиационных факторов;
- свободного режима, где воздействие на персонал радиационных факторов практически исключается.

Поверхности выработок и оборудование зоны строгого режима должны быть защищены материалами, слабо сорбирующими радиоактивные вещества и легко поддающимися дезактивации.

Подземный комплекс включает в себя горные выработки различного назначения, которые выполняют эксплуатационную, транспортную, вентиляционную, коммуникационную, водоотводящую и эвакуационную функции. Совокупность выполняемых функций обуславливает их расположение, протяженность и размеры. К качеству строительных работ предъявляются повышенные

требования в связи со сложными условиями последующей эксплуатации сооружений. В зависимости от природных особенностей массива горных пород устанавливаются способ ее проведения и поддержания в заданный период эксплуатации.

Основными элементами подземного комплекса являются большепролетные камерные выработки, объем которых может достигать 30–60 %, а также вскрывающие и транспортные выработки.

Выработки вскрытия (доступа) горизонтальные или наклонные имеют сечение 30–60 м². Вертикальные выработки, как правило, небольшого сечения имеют диаметр от 4 до 7 м и служат для целей доставки людей и грузов, а также вентиляции. Количество вскрывающих выработок выбирается не менее 2, что соответствует российским нормам проектирования. При проходке вскрывающих, транспортных и вентиляционных выработок используется принцип, принятый в обычном подземном строительстве, — применение «типового решения». При строительстве выработок для размещения реакторных установок, в зависимости от типа оборудования, разрабатывается своя отдельная конструкция. Поперечное сечение камерных выработок может находиться в диапазоне 60–250 м².

Системы вентиляции. Системы вентиляции и очистки воздуха на АСММ должны обеспечивать допустимые климатические условия для работы персонала при различных режимах работы станции, предотвращать загрязнение воздушной среды помещений и атмосферного воздуха радиоактивными и токсичными веществами, поддерживать оптимальные условия работы технологического оборудования. В проекте должны определяться системы вентиляции, относящиеся к локализирующим или обеспечивающим системам безопасности. На АС должен соблюдаться принцип раздельной вентиляции помещений зоны строгого режима и зоны свободного режима. В зоне строгого режима не допускается объединение воздуховодами вентиляционных систем помещений, различных по категории обслуживания (необслуживаемые, периодически обслуживаемые, постоянного пребывания персонала).

Организация вентиляции помещений АС должна исключать поступление воздуха из зоны строгого режима в зону свободного режима. В зоне строгого режима за счет работы вентиляционных систем независимо от режима работы АС должна обеспечиваться направленность движения воздуха только в сторону более «грязных» помещений. Для предотвращения обратных токов воздуха следует устанавливать клапаны избыточного давления. Закрытие быстродействующих герметичных запорных устройств, установленных на воздуховодах вентиляционных систем, должно осуществляться при повышении давления в пределах герметичных оболочек и необслуживаемых помещений.

На АСММ предусматриваются приточно-вытяжные, общеобменные и технологические системы вентилирования с механическим побуждением. При всех режимах работы АС должна исключаться возможность попадания воздуха, выбрасываемого из вентиляционных труб и технологических выхлопных линий в воздухозаборные устройства приточных систем [17].

Для целей воздушного охлаждения помещений допускается использование автономных систем охлаждения, не связанных с общеобменными системами, обеспечивающими санитарно-гигиенические параметры воздушной среды.

Использование общей вентиляционной системы для удаления воздуха из помещений и внутренних объемов технологического оборудования не допускается. На АС должны предусматриваться средства очистки воздуха, удаляемого системами вытяжной вентиляции, от радиоактивных аэрозолей и соединений йода.

Температурный режим. Согласно общим требованиям, температура воздуха в действующих подземных выработках в процессе эксплуатации не должна превышать 26 °С. При температуре свыше 26 °С должны приниматься специальные меры по ее снижению [15]. Для АС вентиляционные системы должны рассчитываться из условия обеспечения на рабочих местах температуры воздуха не выше 33 °С и относительной влажности не более 75 % во время пребывания персонала в пределах оболочки при работающем на мощности реакторе. Максимально допустимая температура воздуха на рабочих местах при кратковременном заходе персонала в герметичную оболочку (не более 2 ч) не должна превышать 40 °С [17, 41].

Хранение радиоактивных материалов. Хранение отработавших ТВС следует предусматривать в бассейнах выдержки, оборудованных биологической защитой, вентиляцией, подводным освещением, системами для отвода тепла и очистки воды от примесей и радиоактивных загрязнений. Должна быть исключена возможность непредусмотренного опорожнения бассейна. Бассейн выдержки должен иметь конструкцию, позволяющую организовать сбор протечек и гидроизоляцию.

Через помещения хранения не должны проходить маршруты к другим эксплуатационным помещениям. Транспортирование загрязненного оборудования и радиоактивных отходов не должно осуществляться через обслуживаемые помещения. Основной и аварийный проходы (шлюзы) должны быть оборудованы герметичными дверями. Конструкция хранилищ радиоактивных отходов должна исключать возможность радиоактивного загрязнения грунтовых и поверхностных вод, обеспечивать контроль и организованный сбор возможных протечек.

Камера реакторного зала с бассейном выдержки должна быть выполнена с гладкими стенами. Пол реакторного зала должен быть облицован нержавеющей сталью и иметь ровную поверхность по всей площади. Выработки, где проходят коммуникации с жидкими радиоактивными средами, должны иметь надежную гидроизоляцию, исключающую возможность попадания радиоактивных сред в нижерасположенные помещения и грунт. Компонировка помещений и проектные решения должны исключать возможность затопления водой и поступление других «замедляющих» материалов в зоны хранения необлученного топлива.

Для поверхностей помещений бассейнов выдержки, колодцев, емкостей, находящихся под длительным заливом радиоактивной жидкости, а также в выработках, в которых возможен вылив радиоактивного жидкометаллического теплоносителя, следует выполнять облицовку из нержавеющей стали. Стены и днища указанных помещений следует, как правило, выполнять двойными — с целью организованного отвода и оперативного обнаружения протечек. Облицовку со стороны бетона допускается выполнять из углеродистой стали.

Способы строительства. Современная практика строительства большепролетных сооружений в скальных породах предусматривает различные технологии их строительства.

Можно выделить некоторые общие принципы строительных решений подземных комплексов. В последние годы в подземном строительстве сформировалась тенденция к сокращению большого многообразия способов строительства, их унификации. Предпочтение отдается способам, отвечающим последним достижениям геомеханики, в которых используются прогрессивные конструкции обделки и средства механизации работ. Отличительными

особенностями этих способов является переход на раскрытие сечения крупными элементами и максимально возможное использование несущих свойств породного массива.

В крепких и средней крепости породах применяют буровзрывную выемку породы. Основные способы строительства, ориентированные на применение буровзрывных работ: сплошного забоя; уступного (ступенчатого) забоя; передовой штольни (пилот-тоннеля). Уступный способ применяют в выработках площадью сечения более 120–130 м² и высотой более 10 м в основном в крепких скальных породах. Сущность уступного способа состоит в разделении сечения выработки на две части, каждую из которых разрабатывают своим забоем, на различных высотных отметках и в разное время. Наиболее распространен вариант с нижним уступом (рис. 5.24), особенно для больших сечений, высоты и значительной протяженности. В первую очередь на всю длину проходят верхнюю часть (калотту). Ее проводят как самостоятельный тоннель способом сплошного забоя с применением буровзрывных работ и, как правило, с временной крепью. С отставанием возводят бетонную крепь свода, включая опорные (выносные) пяты.

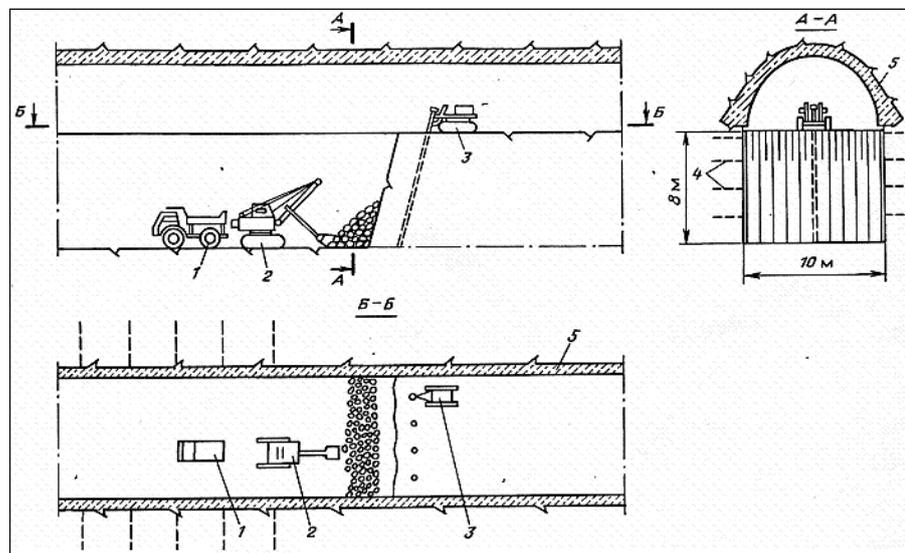


Рис. 5.24. Вариант разработки с нижним уступом [26, 27]:
1 — погрузочная машина; 2 — экскаватор; 3 — буровая установка;
5 — бетонная крепь

В качестве примера на рис. 5.25 показана схема производства работ способом ступенчатого забоя, в известной степени являющаяся вариантом способа нижнего уступа. При этом способе проведение верхней части выработки и уступа осуществляют одновременно, что позволяет сократить сроки строительства и приблизить их к срокам, обеспечиваемым способом сплошного забоя.

Сечение выработки высотой 8 м или более разбивают на 2–4 ступени (ярусы) и разработку забоя растягивают по длине, причем подвигание каждой нижерасположенной ступени ведут с отставанием по длине (на 30–50 м) от разработки ступени, расположенной выше.

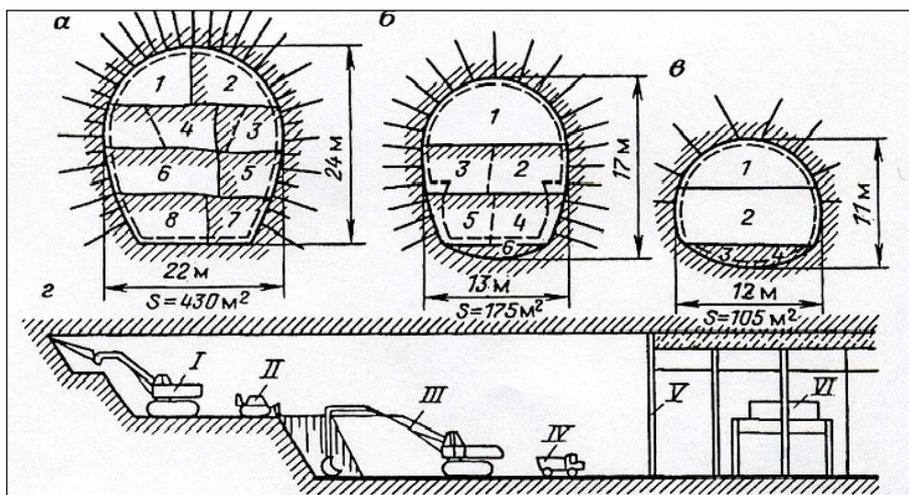


Рис. 5.25. Схема производства работ способом ступенчатого забоя для выработок различного профиля [26]:

1–8 — стадии выемки; *а* — четыре горизонта выемки; *б, в* — три и два горизонта выемки соответственно; *z* — продольный разрез выработки (*I–IV* — горнопроходческое оборудование; *V, VI* — строительные конструкции)

При производстве взрывных работ применяются специальные методы, обеспечивающие щадящее воздействие на массив. Это создает возможность использования приконтурного слоя горной выработки в качестве несущей строительной конструкции.

Проходка модулей под размещение основного оборудования, транспортных и других технологических выработок осуществляется с использованием самоходного оборудования. Работы по строительству этих выработок включают: бурение шпуров глубиной 3–5 м (или скважин длиной 8–12 м), зарядку и взрывание шпуров, проветривание, уборку породы, временное и постоянное крепление.

В качестве примера можно привести перечень основного высокопроизводительного горнопроходческого оборудования, применяемого при строительстве горных выработок: буровое оборудование — Axera D06, Бумер 353E; погрузо-доставочное — TORO 400E, ТОРО-350; транспортное — МоАЗ 6401, TORO 40D; крепление (анкера) — ROBOLT H490; крепление (набрызг-бетон) — Spraymex 6050 WPC.

Бурение шпуров производится автоматизированными буровыми установками на пневмоколесном ходу, отбойку породы производят как на полное сечение выработки, так и по частям. В качестве временной крепи используются сталеполимерные или железобетонные штанги, набрызг-бетон. Постоянное крепление — армированный набрызг-бетон, опалубочный бетон и железобетон, арочная крепь, усиленная или с предварительным натяжением анкерная крепь, а также различные сочетания видов крепи.

Проветривание горизонтальных выработок в период проходки осуществляется по комбинированной схеме (всасывающее и нагнетательное проветривание) вентиляторами местного проветривания с регулированием

температуры подаваемого воздуха. При проходке выработок буровзрывным способом обязательно применение контурного взрывания, которое позволяет обеспечить:

- максимальное соответствие фактической площади сечения выработки проектной (снижение переборов) с целью сокращения расхода бетона на возведение крепи;
- снижение нарушений (трещиноватости и шероховатости) в приконтурной части массива для повышения его несущей способности.

Технология крепления. Особо следует подчеркнуть важность в строительной технологии процессов крепления. Специальные требования к крепям определяются функциональным назначением подземных сооружений. Крепление подземных выработок является одной из главных компонент технологии строительства, а конструкции, способы и средства возведения крепей в значительной мере предопределяют технико-экономические показатели сооружаемого подземного комплекса.

Вопросы проектирования крепей и методы их возведения неразрывно связаны с мониторингом за состоянием приконтурного массива. В качестве основных концептуальных положений крепления подземных сооружений, в том числе большепролетных, необходимо отметить следующие основные позиции:

- максимальное вовлечение в работу приконтурного породного массива и преобразование последнего с помощью различных видов крепей в самонесущую конструкцию, т. е. максимальное использование собственной несущей способности массива;
- использование композитных материалов на основе комплексных минеральных и полимерных вяжущих с добавками ферросиликатов (микросилика), суперпластификаторов, фибры;
- применение литых бетонов традиционных разновидностей, основанных на оптимальном гранулометрическом составе и низкой водопотребности комплексного вяжущего;
- разработка и внедрение различных комбинаций крепей с целью улучшения их функциональных характеристик в период строительства;
- координация процесса возведения крепи с другими технологическими операциями в общей пространственно-временной системе строительства подземного сооружения.

Устойчивость горных выработок в течение всего срока их эксплуатации в первую очередь обеспечивается их креплением. Тип крепи определяется геологическими, горно-механическими, гидрогеологическими и климатическими условиями размещения, а также функциональным назначением выработок, характером ожидаемых внешних воздействий, требованиями долговечности и т. п. При подземном размещении АСММ необходимо учитывать прогнозируемое внутреннее радиационное и тепловое воздействие на крепь (обделку) и выработку.

Выбор конструкции, параметров и расчет крепи выработки должен производиться дифференцированно по участкам пород с одинаковыми свойствами, исходя из оценки устойчивости пород, величин их смещений, нагрузок на крепь, а также с учетом возможности комплексной механизации

процесса возведения крепи, обеспечения надежности и безопасности работ в течение всего срока службы выработки. Проектирование крепи выработок должно включать:

- определение характера проявления горного давления;
- выбор типа крепи и технологии ее возведения;
- прогноз смещения контура пород и расчет нагрузок;
- выбор конструктивной схемы крепи и ее расчет.

Для условий многолетнемерзлых пород перспективным признано применение напрягающих цементов, а также жидких добавок-ускорителей, вводимых в набрызг-бетон вместе с водой затворения. При рассмотрении возведения постоянных железобетонных крепей подземных сооружений как в многолетнемерзлых скальных породах, так и в условиях сезонного промерзания приконтурных скальных массивов следует выделить четыре основных способа «зимнего» бетонирования:

- 1) укладка бетона в утепленную опалубку с твердением смеси до заданной прочности в процессе медленного остывания уложенного бетона;
- 2) метод термоса, в основу которого заложено максимально возможное сохранение и использование тепла, выделяющегося при гидратации цемента;
- 3) метод, основанный на включении в бетонные смеси противоморозных добавок;
- 4) метод с дополнительным подогревом с помощью термоактивных опалубок.

В любом случае необходимо корректно учитывать тепловые потоки на контакте бетон — порода в сторону массива, которые образуются при укладке бетона и в период набора им прочности. В тех случаях, когда отток тепла превышает приемлемые для нормального процесса твердения бетона величины, применяют либо дополнительный подогрев бетонной смеси и породы, либо специальную теплозащитную изоляцию.

В конструкциях монолитной бетонной, сборной железобетонной и железобетонной крепи основных выработок применяется тяжелый бетон марки не ниже М400, для других выработок — не ниже М300.

Для железобетонных конструкций и предварительно напряженных железобетонных конструкций должен применяться тяжелый бетон средней плотности от 2200 до 2500 кг/м³. Допускается применять в необходимых случаях специальные бетоны: особо тяжелый, гидротехнический, жаростойкий.

Проектные марки бетона по морозостойкости и водонепроницаемости следует принимать с учетом системы гидроизоляции или защиты крепи от коррозии в зависимости от климатических и гидрогеологических условий района расположения выработки [34, 42].

В настоящее время в шахтном строительстве наибольшее распространение при креплении выработок практически любого сечения получили так называемые облегченные виды крепи: анкерная (штанговая), набрызг-бетонная и их сочетание, которые по характеру взаимодействия с вмещающим массивом относятся к упрочняющим крепям.

В самостоятельном виде анкерная крепь применяется для поддержания подземных сооружений, размещаемых в слабообводненных, достаточно монолитных породах, вне зоны геологических нарушений. Для закрепления

арматурных стержней в шпурах применяется цементно-песчаная смесь, а также материалы на основе быстросхватывающихся полимерных смол. В последнее время широкое распространение в тоннелестроении получили фрикционные анкера («сплит-сет» и «свеллек»). Непосредственная установка штанговой крепи в шпурах осуществляется с использованием специализированных устройств и автоматизированных агрегатов.

Фибронабрызг-бетон. В практике мирового тоннелестроения при возведении обделок получило распространение применение набрызг-бетона, армированного стальными и другими типами волокон (фибр). Нанесение набрызг-бетона производится специальными серийно выпускаемыми автоматизированными установками. Набрызг-бетон наносится слоями на стенки выработок.

При использовании фибронабрызг-бетона исключается технологическая операция по возведению арматурных сеток, которые закрепляются в кровле и боках выработки на арматурные стержни установленной штанговой крепи. Для изготовления волокон используют обычную сталь, а также с коррозионным покрытием и нержавеющей сталь.

Микросиликаты. Для улучшения свойств бетонной смеси и эксплуатационных свойств материала обделки широко используется микросилика (микросиликаты). Размер зерен в основном менее 0,5 мкм, т. е. ориентировочно в 100 раз меньше, чем размер зерен цемента. Качество микросилики определяется содержанием двуокси кремния. Для набрызг-бетонных работ пригодным считается микросилика с содержанием двуокси кремния 80 %.

Использование сверхтонких минеральных компонентов для бетонов существенно улучшает свойства цементно-песчаной смеси: бетоны данного состава обладают очень высокой начальной прочностью и имеют в 7-суточном возрасте 55–65 % конечной прочности, которая может достигать 150 МПа.

Гидроизоляция. Длительное и надежное функционирование подземного комплекса может быть обеспечено гидроизоляцией горных пород и крепей (обделок) от поступления воды, химической и биологической агрессии, которая осуществляется:

- возведением по всему контуру многослойного покрытия, позволяющего при локальных повреждениях отдельного слоя компенсировать дефекты укладкой последующего слоя;
- нанесением на контур выработки специальных гидроизоляционных гибких мембран и дренажных покрытий;
- инъекцией цементных и полимерных растворов за обделку сооружения и в породный массив;
- использованием специальных добавок в бетон.

Использование мелкодисперсных добавок позволяет получать практически водонепроницаемый бетон. Гидроизоляционные свойства материала улучшаются с возрастанием в нем содержания микросиликатов, а проницаемость значительно ниже обычных бетонов.

Гидроизоляционные материалы должны обладать такими свойствами, как водонепроницаемость, биостойкость, стойкость в агрессивных средах и долговечность.

Оценка безопасности при строительстве подземной АСММ. Любое вторжение в недра Земли приводит к нарушению его естественного состояния.

Для качественной оценки безопасности в процессе подземного строительства выполнен анализ видов, последствий и критичности отказов согласно ГОСТ 27.310-95 [43].

Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций по безопасности подземного строительства и приоритетности мер инженерной защиты окружающей среды. В табл. 5.5 представлена характеристика критичности для ранжирования отказов.

Таблица 5.5

Характеристика критичности для ранжирования отказов

Ожидаемая частота возникновения отказа, (1/год)	Тяжесть последствий			
	Катастрофический отказ (кат. IV)	Критический отказ (кат. III)	Некритический отказ (кат. II)	Отказ с малыми последствиями (кат. I)
Частый отказ >1	A	A	A	C
Вероятный отказ $1-10^{-2}$	A	A	B	C
Возможный отказ $10^{-2}-10^{-4}$	A	B	B	D
Редкий отказ $10^{-4}-10^{-6}$	A	B	C	D
Практически невероятный отказ $<10^{-6}$	B	C	C	D

Ранги отказов:

A — обязателен углубленный количественный анализ критичности;

B — желателен количественный анализ критичности;

C — можно ограничиться качественным анализом;

D — анализ и принятие мер не требуется.

Критерии таблицы могут применяться для определения степени риска всей системы «подземное сооружение массив горных пород — технология строительства — окружающая среда». В этом случае ранг A соответствует наиболее высокой степени риска, при которой требуются незамедлительные меры по обеспечению мер безопасности; показатели B, C отвечают промежуточным степеням риска, а ранг D — наиболее низким степеням риска.

В общем случае показатель критичности отказа выражается формулой (5.1), хотя возможно применение иных способов измерения критичности отказов.

$$K = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3, \quad (5.1)$$

где K — критичность отказа; V_1 — оценки вероятностей отказов в баллах; V_2 — оценка вероятности последствий в баллах; V_3 — оценка вероятности обнаружения отказа до сдачи объекта потребителю.

Для определения возможного ущерба от наступления определенных последствий каждого отказа применяют относительные балльные оценки с использованием соответствующей шкалы. Пример шкалы балльных оценок критичности отказов представлен в табл. 5.6–5.8.

Общая схема (алгоритм) анализа видов, последствий и критичности отказов включает следующие операции:

- идентификация всех функций, выполняемых объектом;

- для каждой функции определяется перечень возможных нарушений (отклонений) данной функции;
- для каждого нарушения функции качественно оценивают тяжесть возможных последствий этого нарушения или количественно — ожидаемый ущерб.

Таблица 5.6

Оценки вероятностей отказов

Виды отказов по вероятности возникновения за время эксплуатации	Ожидаемая вероятность отказов*	Оценка вероятности отказа V_1 в баллах
Отказ практически невероятен	Менее 0,00005	1
Отказ маловероятен	0,00005...0,001	2
Отказ имеет малую вероятность, обусловленную только точностью расчета	0,001...0,005	3
Умеренная вероятность отказа	0,005...0,001	4
Отказы возможны, но при испытаниях или в эксплуатации аналогичных изделий не наблюдались	0,001...0,005	5
Отказы возможны, наблюдались при испытаниях и в эксплуатации аналогичных изделий	0,001...0,005	6
Отказы вполне вероятны	0,005...0,01	7
Высокая вероятность отказов	0,01...0,10	8
Вероятны повторные отказы	Более 0,11	10

*Оцененная расчетом или экспериментальным путем.

Таблица 5.7

Оценки последствий отказов

Описание последствий отказов	Оценка последствий в баллах V_2
Отказ не приводит к заметным последствиям, наличие нарушений, вероятно, не обнаружится	1
Последствия отказа незначительны, но потребитель может выразить неудовольствие его появлением	2–3
Отказ приводит к заметному для потребителя снижению эксплуатационных характеристик и/или к неудобству применения	4–6
Высокая степень недовольства потребителя, эксплуатация невозможна, но угрозы безопасности отказ не представляет	7–8
Отказ представляет угрозу безопасности людей или окружающей среде	9–10

Самой распространенной и значимой причиной отказа подземного комплекса может стать потеря устойчивости выработок для размещения оборудования, которая может произойти в результате изменения свойств крепей и конструкций или их разрушений.

Таблица 5.8

Оценка вероятности обнаружения отказа

Виды отказов по вероятности обнаружения до сдачи строительного объекта	Вероятность обнаружения отказа, оцененная расчетным или экспертным путем	Оценка вероятности в баллах B_3
Очень высокая вероятность выявления отказа при контроле или испытаниях	Более 0,95	1
Высокая вероятность выявления отказа при контроле или испытаниях	0,95...0,85	2–3
Умеренная вероятность выявления отказа при контроле или испытаниях	0,85...0,45	4–6
Высокая вероятность сдачи строителями дефектного объекта	0,45...0,25	7–8
Очень высокая вероятность сдачи строителями дефектного объекта	Менее 0,25	9–10

Основные причины, по которым это может произойти, следующие:

- сейсмические нагрузки;
- геомеханические нагрузки;
- снижение крепями и конструкциями фильтрационной надежности;
- снижение несущих свойств в результате ошибки в проектировании и т. д.;
- изменение несущих свойств породного массива в результате оттаивания.

В настоящей работе оценка показателя критичности отказа проведена на примере строительства в скальных породах горизонтальной выработки сечением 35 м². За основу влияния строительной технологии принимались возможные отрицательные последствия от отдельного процесса строительства выработки. В качестве основных процессов были рассмотрены: буровые работы, взрывные работы, экскавация горной породы и крепление горной выработки. Результаты оценки показателя критичности отказа горной выработки в процессе ее строительства для различных сегментов представлены в табл. 5.9 и на рис. 5.26.

Как видно из табл. 5.9, критичность отказа при строительстве выработки для буровых работ и экскавации породы минимальна и составляет незначительную величину, равную 1–4. Взрывные работы оказывают сильное воздействие на горный массив на этапе строительства, что в дальнейшем может привести к снижению физико-механических характеристик массива, повышению проницаемости пород.

Таблица 5.9

Оценка показателя критичности отказа горной выработки

Сегмент строительной технологии	Возможные отрицательные последствия	Оценка вероятности отказа, баллы	Оценка последствий, баллы	Оценка вероятности обнаружения отказа, баллы	Критичность отказа, баллы
Буровые работы	Загрязнение шахтных вод буровым шламом, частичное пылеобразование	1	2	2	4
Взрывные работы	Снижение физико-механических свойств массива, загрязнение воздушной среды, оттаивание пород	6	4	5	120
Эксплуатация породы	Загрязнение воздушной среды, оттаивание пород	1	1	1	1
Крепление выработок	Потеря устойчивости выработки	7	10	5	350

Крепление выработки влияет на ее устойчивость, особенно в процессе эксплуатации. Критичность отказа в результате выхода из строя конструкции крепи, особенно при длительной эксплуатации, может составить 350 баллов.

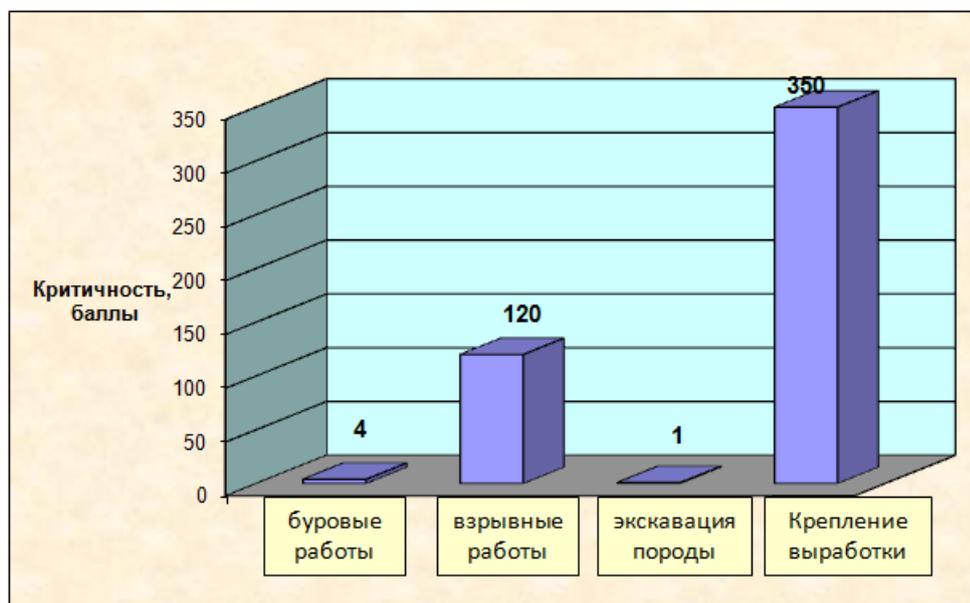


Рис. 5.26. Диаграмма оценки показателя критичности отказа горной выработки в процессе ее строительства для различных сегментов строительной технологии

5.3.3. Теплоизоляционные системы и материалы в условиях отрицательных температур

Обеспечение устойчивости подземных сооружений в многолетнемерзлых породах связано с поддержанием стационарного теплового режима на всех этапах жизненного цикла подземного объекта. Воздействие циклов замораживания-оттаивания на горные породы приводит к их интенсивному выветриванию, снижению прочности вплоть до полной дезинтеграции. При оттаивании горных пород их прочность снижается, устойчивое состояние выработки нарушается, и увеличивается нагрузка на крепь. Когда нагрузки на крепь превышают допустимые значения, происходят необратимые деформации кровли и стенок выработки, последствиями которых могут быть отслоение и обрушение пород приконтурного массива.

Поскольку образуемое тепло может оказать негативное воздействие на вмещающий породный массив, разрабатываемые проекты должны быть направлены на сохранение первоначальных свойств породного массива и включать меры по их защите.

Для обеспечения устойчивости горных выработок подземного комплекса АСММ в многолетней мерзлоте возможно использование различных термозащитных систем, которые устанавливаются как на стадии строительства выработки, так и при эксплуатации комплекса.

В качестве основных можно отметить следующие системы:

- искусственное охлаждение;
- теплоизоляция;
- принудительное замораживание при строительстве и в аварийных ситуациях;
- использование систем отвода тепла;
- использование конструкционных материалов для снижения влияния как положительных, так и отрицательных температур на горные породы и бетонные конструкции.

Искусственное охлаждение. Охлаждение выемочного пространства в период строительства применяют для поддержания пород в мерзлом состоянии, а также для восстановления мерзлоты после ее нарушения в процессе проходки путем нагнетания холодного воздуха с дневной поверхности. В зимний период воздухозабор осуществляют непосредственно с поверхности, в летний период воздух принудительно охлаждают до необходимой температуры. Схема нагнетания холодного воздуха с поверхности при строительстве подземных выработок показана на рис. 5.27.

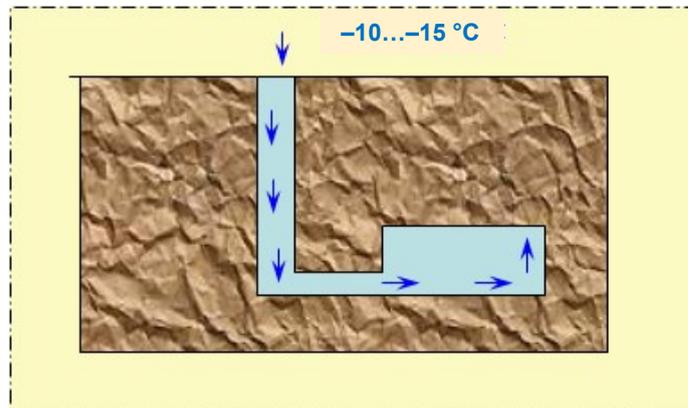


Рис. 5.27. Принципиальная схема нагнетания холодного воздуха с поверхности

Существуют различные способы для охлаждения воздуха, подаваемого в горные выработки. Среди них широкое использование получили такие источники, как атмосфера дневной поверхности и исходящая струя рудничного воздуха.

Использование исходящей струи шахтного воздуха осуществляется за счет применения комбинированных схем проветривания с частичной рециркуляцией исходящей струи после ее очистки и смешивания со свежей струей воздуха, подаваемого в выработки. Можно отметить, что в последние годы подавляющее большинство россыпных шахт Колымы и Чукотки переведены на эту схему проветривания.

Искусственное замораживание грунтов. Искусственное замораживание грунтов, как эффективный и надежный способ повышения устойчивости породного массива в криолитозоне, получил широкое распространение в мировой и отечественной практике. Замораживание позволяет обеспечить защиту

подземных сооружений в чрезвычайный период эксплуатации или при аварии. С его помощью можно замораживать массивы грунта как на локальных участках, так и на больших площадях.

Процесс замораживания состоит из двух периодов: периода образования льдогрунтового ограждения (активное замораживание) до начала проходки тоннеля и периода поддержания отрицательной температуры замороженного грунта до окончания работ по сооружению тоннеля (пассивное замораживание). В период активного замораживания к колонкам подают максимальное количество холода, а в период пассивного замораживания — количество холода, необходимое только для поглощения тепла, притекающего к замороженным грунтам. Средняя температура льдогрунтового ограждения обычно составляет $-5...-10$ °С, но может достигать $-15...-20$ °С. Существует несколько способов искусственного замораживания грунтов [44, 45].

Замораживание грунтов рассольным способом. Работы по проведению замораживания начинают с бурения скважин и установки в них замораживающих колонок с питающими трубами. Параллельно ведут работы по строительству замораживающей станции, монтажу оборудования и рассолопроводов.

Для замораживания грунтов используют так называемый холодильный агент (хладагент). Обычно в качестве хладагента применяют охлажденный водный раствор хлористого кальция (рассол), который обладает способностью оставаться жидким при отрицательных температурах. Ориентировочное время для создания замороженного контура при расстоянии между скважинами 0,6–1,25 м находится в пределах от 20 до 60 суток. Этот процесс называют активным замораживанием.

Низкотемпературное замораживание жидким азотом. В последние годы в практике метростроения для искусственного замораживания грунтов стали применять новый хладагент — жидкий азот, представляющий собой бесцветную жидкость, температура испарения которой очень низка ($-195,8$ °С при атмосферном давлении). В отличие от других промышленных хладагентов (аммиака, азота, фреона-143 и углекислоты), которые можно использовать только в замкнутой системе холодильной установки, жидкий азот используют однократно (испаряющийся газ выпускают в окружающую среду).

Скорость замораживания увеличивается в 8–9 раз, что особенно важно при больших скоростях фильтрации грунтовых вод, а также при поступлении термальных и минерализованных вод [45]. На замораживание 1 м³ грунта с содержанием воды до 30 % расходуется 1000 л жидкого азота. Несмотря на указанные преимущества, замораживание жидким азотом осуществляют в настоящее время довольно редко. Это объясняется сравнительно высокими экономическими затратами, связанными с высокой стоимостью жидкого азота и значительным его расходом на замораживание 1 м³ грунта.

В некоторых случаях может оказаться эффективным комбинированный способ замораживания: создание льдогрунтового ограждения с использованием жидкого азота и поддержание грунтов в замороженном состоянии в период строительства тоннеля с использованием рассольного способа.

Основные способы тепловой изоляции породного массива. Одним из эффективных способов обеспечения устойчивости выработок в условиях

многолетнемерзлых пород является их теплоизоляция, которая позволяет исключить или значительно уменьшить термоциклическое воздействие на массив горных пород. Применение теплоизоляции в знакопеременном или положительном тепловом режиме позволяет регулировать температурное поле массива горных пород вокруг выработок, обеспечить требуемые параметры микроклимата, сократить потери тепловой энергии, уменьшить отток тепла, выделяемого работающими агрегатами и механизмами в окружающий массив.

С помощью управления термическим сопротивлением теплоизоляции можно сохранить породы в мерзлом состоянии или уменьшить глубину оттаивания до значений, при которых нагрузки на крепь не превысят ее несущую способность [46, 47].

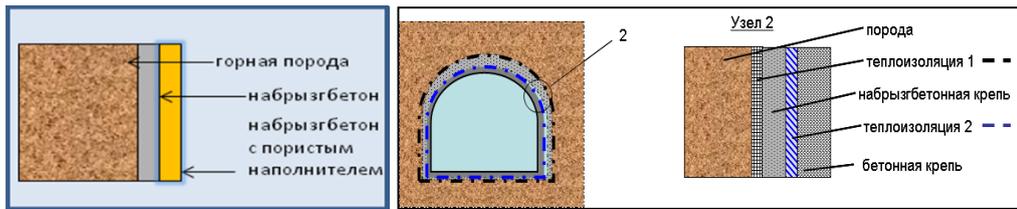
Применение теплоизоляции значительно снижает затраты на поддержание горных выработок, пройденных в многолетнемерзлых породах, и позволяет снизить:

- колебания температуры воздуха, так как интенсивность теплообмена с породами резко уменьшается;
- интенсивность массообменных процессов, так как исключается прямой контакт воздуха с увлажненными поверхностями выработки;
- процесс аккумуляции тепла мерзлыми породами [48].

Как показывает практика ведения работ в горнодобывающей промышленности, положительные результаты получены при использовании набрызг-бетонных теплозащитных покрытий. Они уменьшают глубину протаивания окружающих пород, эксплуатирующихся в знакопеременном или положительном тепловом режимах, уменьшая тем самым нагрузку на крепь (оболочку). При хорошей адгезии теплозащитного набрызг-бетона к горной породе будет образовываться единая система «порода — теплозащитная крепь» по аналогии с набрызг-бетонной крепью со всеми присущими ей положительными свойствами.

Широкое применение для теплоизоляции в строительстве нашли легкие бетоны. Все компоненты смеси для приготовления легких бетонов негорючи, нетоксичны, а прочностные и теплозащитные свойства легких бетонов варьируют в довольно широких пределах. В качестве заполнителя для теплозащитного набрызг-бетона может использоваться вермикулит, азерит, керамзит, шлаки, перлит и др.

Для условий криолитозоны могут применяться различные варианты конструкций набрызг-бетонных покрытий. Прочностные свойства пористого бетона недостаточны для самостоятельного использования в качестве конструкционного материала, поэтому наибольшая эффективность достигается при использовании слоистой крепи, первый слой которой — обычный набрызг-бетон, а второй слой содержит легкий наполнитель или различные виды утеплителя. На рис. 5.28 показаны различные виды теплоизоляции горной выработки на основе набрызг-бетона. Кроме того, использование ускорителей твердения и противоморозных добавок позволяет получать хорошую адгезию бетона к горным породам и при низких температурах, характерных для подземных горных выработок зоны многолетнемерзлых пород.



Пористый набрызг-бетон

Набрызг-бетон с несколькими слоями теплоизоляции

Рис. 5.28. Различные виды теплоизоляции горной выработки на основе набрызг-бетона

Теплоизоляционный экран на основе напыления полимерных составов приведен на рис. 5.29. Технология основана на напылении на стенки выработки жидких полимерных материалов, которые при вспенивании создают теплоизоляционный экран. Толщина слоя может составлять 3–10 см. Технология проста в применении и обеспечивает высокую производительность напыления до 2000–3000 м² в смену.

Преимущества полимерных покрытий: хорошая адгезионная способность; упругость и пластичность материала, не приводящая к образованию трещин; короткое задаваемое время отверждения; непроницаемость для воздуха, газа и воды после отверждения материала.



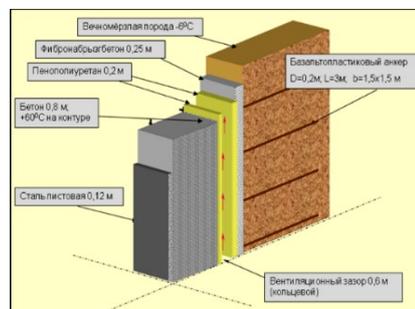
Рис. 5.29. Теплоизоляционный экран на основе напыления полимерных материалов [49]

Теплоизоляция с образованием воздушной прослойки между породой и конструктивными элементами, которая значительно уменьшает теплообмен (рис. 5.30). Есть возможность регулировать тепловые процессы путем подачи в воздушный канал холодного воздуха.

Теплоизоляция сборными блоками крепления. Сборные блоки выполняют функцию крепления и теплоизоляции. Элементы изоляции железобетонных блоков крепления изображены на рис. 5.31. Специальный теплоизоляционный материал закрепляется на поверхности блоков сборной железобетонной обделки (тубинга) в заводских условиях.



Изоляция горизонтальной выработки (пенополиэтиленом) [38]



Изоляция вертикальной выработки (пенополиуретаном)

Рис. 5.30. Теплоизоляция с образованием воздушной прослойки



Рис. 5.31. Элементы теплоизоляции железобетонных блоков (тубинги) крепления [38]

Теплоизоляционные материалы. Эффективность теплоизоляционных материалов достигается при условии оптимального выбора соответствующих материалов для данных условий: отрицательная температура горных пород, высокая влажность движущегося по выработке воздуха, неустойчивость оттаявших пород и пород с температурами, близкими к нулю, и длительный срок эксплуатации выработок. Второстепенное влияние на выбор теплоизоляционных материалов оказывают неровности подвергаемой теплоизоляции поверхности, пространственная стесненность при нанесении или укреплении теплоизоляции, а также пожароопасность.

Обычно в качестве теплоизоляции пород наиболее часто используют материалы на основе пенополиуретанов, легкие бетоны и ряд других. Наибольшее распространение получили базальтовые и полиуретановые покрытия.

Базальтовый утеплитель отличается рядом положительных свойств: высокие теплозащитные свойства; негорючесть; способность не впитывать влагу; устойчивость к деформациям; экологичность; не разрушается при действии теплосмен «нагрев-охлаждение»; стабильность характеристик

и геометрических форм при повышении и циклическом действии температуры; срок службы материалов из базальтового волокна примерно 30–40 лет [50, 51]. Пенополиуретановые покрытия являются эффективным средством обеспечения нормативных параметров теплового режима в подземных сооружениях криолитозоны и устойчивости горных выработок. Основные свойства некоторых материалов, рекомендованных для теплоизоляционных конструкций, приведены в табл. 5.10.

Отрицательная температура горных пород и высокая влажность воздуха при его положительной температуре способствует конденсации влаги на поверхности изоляции, особенно при длительной эксплуатации выработок. Наличие даже незначительных следов влаги в материале (до 3–5 %) ухудшает его теплофизические свойства, так как теплопроводность воды в 25 раз больше теплопроводности воздуха. Поэтому при теплоизоляции горных выработок следует ориентироваться на современные полимерные теплоизоляционные материалы, сочетающие в себе высокие теплоизоляционные свойства с хорошими эксплуатационными характеристиками.

Для достижения низкой гигроскопичности и надежной паронепроницаемости традиционных теплоизоляционных материалов (стеклянная и минеральная вата, цементный фибролит, ячеистые бетоны и др.) необходимо устраивать дополнительные пароизоляционные слои, подвергать специальной обработке поверхности, обертывать теплоизоляцию водонепроницаемыми пленками из синтетических материалов. Вышеперечисленные способы теплоизоляции в условиях многолетней мерзлоты успешно применяются с материалами с закрытой пористостью. В этом случае исключается появление при низких температурах конвекции в теплоизоляционном слое и создается сопротивление диффузии водяного пара из окружающего воздуха.

Наличие теплоизоляции существенно снижает интенсивность теплообмена между воздухом и вмещающим породным массивом. При этом с повышением начальной температуры воздуха роль теплоизоляции значительно возрастает.

Теплоизоляция увеличивает время возможного начала оттаивания пород, окружающих выработку, причем время наступления положительной температуры на стенке выработки зависит от толщины теплоизоляции и естественной температуры мерзлых пород.

Противоморозные цементы. При возведении монолитных бетонных и железобетонных обделок тоннелей необходимо решить задачу набора прочности бетоном, твердеющим при отрицательных температурах. В данных условиях используют специальные способы обеспечения температурных условий транспортирования, укладки и твердения бетона. В качестве основного способа, как правило, применяют подогрев укладываемой бетонной смеси, а при температуре в выработке ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ подогревают воздух в тоннеле, но не выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы обеспечить устойчивость ледогрунтового ограждения. Для уменьшения расхода тепла на подогрев воздуха в тоннеле поддерживают повышенную температуру только на участке производства бетонных работ. С этой целью участок бетонирования ограждают от остальной части выработки шторными завесами. Все эти мероприятия усложняют процесс возведения обделки тоннеля, а также значительно снижают темпы проходки [52].

Таблица 5.10

Основные свойства теплоизоляционных материалов [35]

Тип материала	Объемная масса, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Пористость	Температура применения, °С		Огнестойкость материалов
				T_{\min}	T_{\max}	
Минеральная вата	50–200	0,047–0,07	Открытая	-100	+600	Несгораемые
Материалы из стеклянного волокна	75–200	0,047–0,064	Открытая	-180	+450	Несгораемые и трудносгораемые
Песок перлитовый мелкий	75–150	0,047–0,052	Открытая	-200	+855	Несгораемые
Полимерные материалы						
Полистирольные	40–65	0,035–0,052	Закрытая	-180	+70	Сгораемые
Поливинилхлоридные	65–150	0,052–0,058	Закрытая	-180	+60	Сгораемые
Фенолформальдегидные	85–200	0,043–0,058	Открытая	-180	+150	Трудносгораемые
Пенополиуретановые	40–200	0,035–0,07	Закрытая	-60	+120	Сгораемые

Применение специальных противоморозных цементов в составе бетонов для возведения обделок тоннелей в замороженных грунтах позволяет отказаться от мероприятий по подогреву бетонной смеси и обогреву участков бетонирования в выработке. Противоморозные цементы представляют собой комплексы, состоящие из подобранных специальным образом по химико-минералогическому составу портландцементов, высокоэффективных ПАВ и солей алифатических поликислот. Общее количество химических добавок в комплексе не превышает 4 %, также они не содержат хлориды и другие коррозионно-активные вещества.

Применение специальных противоморозных цементов «ПолиРелакС ПМ400» и «ПолиРелакС ПМ500», имеющих условное обозначение «ПРС ПМ-400» и «ПРС ПМ-500», позволяет повысить эффективность использования бетонов, твердеющих при отрицательной температуре. Эти специальные цементы имеют высокие показатели прочности на сжатие при температуре твердения $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от 25 до 55 МПа). Образцы бетона обладают высокой интенсивностью набора прочности [53].

Противоморозные добавки в бетон. Этот способ получил большее распространение благодаря своей экономичности, по сравнению с электрическим обогревом всей конструкции. Существующие противоморозные (антиморозные) добавки для бетона действуют в трех направлениях:

- 1) непосредственно снижают температуру застывания воды (антифризы);
- 2) ускоряют процесс твердения бетона (ускорители схватывания);
- 3) способствуют лучшей растворимости компонентов бетона в воде за счет образования комплексных солей (приводит к понижению температуры застывания).

Антифризы, вводящиеся в бетон для уменьшения температуры кристаллизации воды, содержат распространенные неорганические соли натрия и кальция, а также органические соединения. Выбор конкретной добавки осуществляется исходя из технических и эксплуатационных параметров возводимых сооружений

Использование противоморозных добавок повышает стабильность раствора не только при понижении температуры, но и при ее периодических колебаниях. В первые дни прочность бетона увеличивается быстро, а затем снижается, достигая максимума через 2–4 недели. Минимальная средняя температура, при которой можно использовать бетоны с противоморозными добавками, составляет $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (отдельные присадки работают при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$). К числу известных в строительной промышленности марок относятся:

- «Masterpozzolith» (501HE или MR25K) — (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) содержит нитрат кальция;
- «Бест» — противоморозная добавка в бетон реализуется в жидком или твердом виде и предназначена для использования при температуре не ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ее компоненты ускоряют процесс схватывания бетона и позволяют достичь 90 % от проектной прочности в течение 3 суток после применения;
- «Фриз» — препятствует застыванию бетонной смеси. Минимально допустимая рабочая температура бетона составляет $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Широкое распространение бетонов со специальными добавками в зимнее время года позволило выявить их положительные свойства, среди которых необходимо отметить:

- высокую скорость схватывания на морозе;

- быстрый набор прочности раствором, что позволяет применять противоморозные добавки не только при отрицательных, но и при положительных температурах (например, при сжатых сроках строительства) [53].

Применение противоморозных бетонов является обязательным условием проведения строительных работ как в холодное время года, так и в условиях многолетнемерзлых пород. В зависимости от состава и концентрации применяемых присадок бетонные растворы могут дополнительно подогреться или использоваться в холодном виде.

5.3.4. Ориентировочная оценка технико-экономических показателей строительства подземных АСММ с реакторными установками различного типа

Сравнительная оценка стоимости строительства подземных АСММ проводилась по горно-капитальным работам. За основу были приняты концептуальные модели подземных комплексов для различных типов реакторных установок. В конструкциях подземного комплекса рассматривалось вскрытие горизонтальными выработками при различных компоновочных схемах основных и вспомогательных выработок. В зависимости от мощности реакторной установки оценивались схемы с последовательным и параллельным расположением камерных выработок, а также со смешанной компоновкой главных камерных выработок и кольцевой транспортной схемой.

Основной объем горно-капитальных работ приходится на строительство вскрывающих, транспортных и камерных выработок. Проходка всех горных выработок осуществляется по буровзрывной технологии с использованием самоходного оборудования. На рис. 5.32 показана ориентировочная стоимость горно-строительных работ для различных вариантов вскрытия подземного комплекса одной выработкой до глубины 100 м от поверхности.



Рис. 5.32. Стоимость горно-строительных работ при различных вариантах вскрытия

Стоимость горно-строительных работ подземного комплекса АСММ рассчитана по укрупненным расценкам с учетом накопленного практического опыта строительства подземных сооружений на горнорудных предприятиях Заполярья.

Исходя из принятых параметров выработок подземного комплекса рассчитывались основные показатели строительства. В условиях отсутствия какой-либо информации о параметрах помещений, связанных с обращением с радиоактивными материалами, в оценках основных показателей строительства не учитывались выработки, предназначенные для хранения ОЯТ и РАО.

Оценка объемов горно-строительных работ подземного комплекса проводилась по показателям, имеющим наибольший удельный вес при строительстве объекта:

- объем вынимаемой горной породы;
- количество укладываемого бетона на крепление и возведение различных конструкций;
- масса используемого металла.

На рис. 5.33 показана расчетная компоновочная схема подземного комплекса АСММ для диапазона мощности 20–50 МВт (без вскрывающих и вспомогательных выработок).

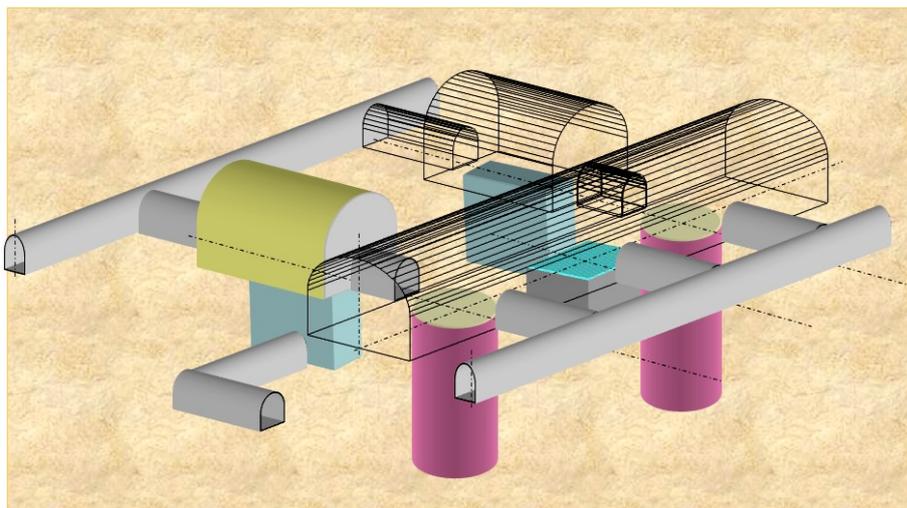


Рис. 5.33. Принципиальная расчетная компоновочная схема подземного комплекса АСММ в диапазоне мощностей 20–50 МВт

Ориентировочный объем вынимаемой горной массы при строительстве подземного комплекса указан в табл. 5.11, количество бетона, используемого для крепления выработок и сооружения монолитных конструкций, представлено в табл. 5.12. Количество металла, используемого при сооружении подземных объектов в качестве крепежного материала (металлические анкера), арматуры при бетонировании и облицовки выработок для различных реакторных установок, представлено в табл. 5.13, ориентировочный расход теплоизоляционных материалов при сооружении подземных объектов приведен в табл. 5.14.

Таблица 5.11

Ориентировочный объем вынимаемой горной массы
при строительстве подземного комплекса, м³

Наименование выработки	Мощность, МВт (тип установки)			
	50–100 (СВБР-100)	20–50 (КЛТ-40С, РИТМ-200)	5–15 («Униатерм», АБВ-6, Шельф, СВБР-10)	1–3 (блочно- трансп., ТЭС-3)
Выработки вскрытия	13000	15000	13000	3500
Транспортные	2600	3500	2300	3500
Вентиляционные	4000	4000	2100	1000
Камера реактора	6500	8500	3200	200
Турбинное отделение	7200	11000	4600	0
Вспомогательная камера	1000	1000	600	200
Технологические выработки	1200	3000	1200	600
Итого	35500	46000	27000	9000
Неучтенные объемы, 10 %	3550	4600	2700	900
Всего	39050	50600	29700	9900

Таблица 5.12

Количество бетона, используемого для крепления выработок
и сооружения монолитных конструкций, м³

Наименование выработки	Мощность, МВт (тип установки)			
	50–100 (СВБР-100)	20–50 (КЛТ-40С, РИТМ-200)	5–15 («Униатерм», АБВ-6, «Шельф», СВБР-10)	1–3 (блочно- трансп., ТЭС-3)
Выработки вскрытия	1100	1300	1100	400
Транспортные	300	800	600	400
Вентиляционные	400	600	350	150
Камера реактора	1100	1600	800	200
Турбинное отделение	500	1050	300	0
Вспомогательная камера	150	150	100	50
Технологические выработки	200	600	200	100
Итого	3750	6100	3450	1300
Неучтенные объемы бетона, 10 %	375	610	345	130
Всего	4125	6710	3795	1430

Таблица 5.13

Количество используемого металла
при сооружении подземных объектов, т

Наименование выработки	Мощность, МВт (тип установки)			
	50–100 (СВБР-100)	20–50 (КЛТ-40С, РИТМ-200)	5–15 («УниTERM», АБВ-6, «Шельф», СВБР-10)	1–3 (блочно- трансп., ТЭС-3)
Выработки вскрытия	100	130	130	60
Транспортные	100	100	100	30
Вентиляционные	300	400	400	30
Камера реактора	800	1050	1050	50
Турбинное отделение	580	920	920	0
Вспомогательная камера	300	400	500	20
Технологические выработки	120	300	300	10
Итого	2300	3300	3400	200
Неучтенные объемы металла, 10 %	230	330	340	20
Всего	2530	3630	3740	220

Таблица 5.14

Расход теплоизоляционных материалов
при сооружении подземных объектов, кг

Наименование выработки	Мощность, МВт (тип установки)			
	50–100 (СВБР-100)	20–50 (КЛТ-40С, РИТМ-200)	5–15 («УниTERM», АБВ-6, «Шельф», СВБР-10)	1–3 (блочно- трансп., ТЭС-3)
Выработки вскрытия	2900	3300	2900	780
Транспортные	800	1300	800	420
Вентиляционные	620	620	620	420
Камера реактора	1700	2500	1700	360
Турбинное отделение	1400	2350	1260	0
Вспомогательная камера	300	700	300	120
Технологические выработки	1700	2400	2110	600
Итого	9420	13170	9690	2700
Неучтенные объемы, 10 %	942	1317	969	270
Всего	10362	14487	10659	2970

Сведения об ориентировочной стоимости строительства подземных комплексов АСММ по диапазону мощностей 50–100 МВт; 20–50 МВт; 5–15 МВт; 1–3 МВт приведены в табл. 5.15–5.18.

Таблица 5.15

Оценка стоимости строительства подземного комплекса мощностью 50–100 МВт

Показатели	Объем работ	Стоимость единицы, тыс. руб.	Общая стоимость, млн руб.
Выемка горной массы, м ³	39050	40	1562
Бетонные работы, м ³	4125	9	37
Металл, т	2530	100	253
Теплоизоляционный материал, кг	10362	1,5	16
Итого			1868
Неучтенные затраты, 10 %			187
Всего			2055

Таблица 5.16

Оценка стоимости строительства подземного комплекса мощностью 20–50 МВт

Показатели	Объем работ	Стоимость единицы, тыс. руб.	Общая стоимость, млн руб.
Объем вынимаемой горной массы, м ³	50600	40	2024
Объем бетонных работ, м ³	6710	9	60
Металл, т	3630	100	363
Теплоизоляционный материал, кг	14487	1,5	22
Итого			2469
Неучтенные затраты, 10 %			247
Всего			2716

Таблица 5.17

Оценка стоимости строительства подземного комплекса мощностью 5–15 МВт

Показатели	Объем работ	Стоимость единицы, тыс. руб.	Общая стоимость, млн руб.
Объем вынимаемой горной массы, м ³	29700	40	1188
Объем бетонных работ, м ³	3795	9	34
Металл, т	3740	100	374
Теплоизоляционный материал, кг	10659	1,5	16
Итого			1612
Неучтенные затраты, 10 %			161
Всего			1773

Таблица 5.18

Оценка стоимости строительства
подземного комплекса мощностью 1–3 МВт

Показатели	Объем работ	Стоимость единицы, тыс. руб.	Общая стоимость, млн руб.
Объем вынимаемой горной массы, м ³	9900	40	396
Объем бетонных работ, м ³	1430	9	13
Металлы, т	220	100	22
Теплоизоляционный материал, кг	2970	1,5	4
Итого			435
Неучтенные затраты, 10 %			44
Всего			479

Основные технико-экономические показатели строительства (в ценах 2018 г.) подземных комплексов АСММ с реакторами различного типа представлены в табл. 5.19.

Таблица 5.19

Основные технико-экономические показатели строительства
подземных АСММ с реакторными установками различного типа

Показатели	Тип реактора			
	СВБР-100	КЛТ-40С, РИТМ-200	«УниTERM», АБВ-6, «Шельф», СВБР-10	Блочно-трансп., ТЭС-3
Установленная мощность, МВт	50–100	20–50	5–15	1–3
Строительный объем (по породе), м ³	39050	50600	29700	9900
Время строительства, лет	4	5	3	1
Капитальные затраты, млн руб., в том числе	2055	2716	1773	479
проходка горных выработок	1562	2024	1188	396
крепление выработок и сооружение бетонных конструкций	37	60	34	13
металлоконструкции и теплозащитные экраны	269	385	390	26
Удельные затраты, тыс. руб./кВт	21	54	118	160

Как показывает выполненная ориентировочная технико-экономическая оценка, основная доля (70–80 %) капитальных затрат на горно-строительные

работы приходится на проходку горных выработок подземного комплекса. С увеличением мощности реакторной установки удельные капитальные затраты на горно-строительные работы уменьшаются.

Выводы по главе 5

Основные научные и практические результаты исследований в области обоснования методологии создания подземных комплексов АСММ в условиях Арктики можно сформулировать следующим образом.

В настоящее время наблюдается новый подход, связанный с развитием модульной подземной энергетики, основанный на использовании реакторов малой мощности, которые обладают небольшими размерами и повышенной надежностью.

Оценка мирового опыта в области строительства подземных атомных станций малой мощности показала повышение активности в области проектирования и строительства подземных комплексов. Среди передовых стран удельный вес патентования в рассматриваемой области за последнее время имеет соотношение: Китай — 51,7 %; Россия — 18,3 %; США — 16,7 %, Япония — 13,3 %.

В работе рассмотрены общие представления о концепции подземной АСММ, базирующейся на идее использования защитных и изолирующих свойств породного массива, которые в сочетании с искусственными барьерами обеспечивают комплексную безопасность атомного объекта: защита от любых внутренних (аварии на станции) и внешних воздействий (техногенных, природных, военных и террористических действий). Это позволяет располагать станции в непосредственной близости от потребителей.

На основе требований современных нормативных документов сформулированы принципы обеспечения безопасности подземной атомной станции на всех этапах жизнедеятельности: проектирование, строительство, эксплуатация и ликвидация объекта.

Сформирована группа критериев, определяющих выбор конструктивно-компоновочных решений с учетом комплексного характера требований:

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

На основе оценки параметров подземных выработок для размещения основного оборудования АСММ с РУ различного типа обоснованы конструктивные и объемно-компоновочные решения подземных комплексов АСММ. Дана оценка рациональности компоновки подземного комплекса для различных реакторных групп оборудования.

Концептуальный подход к выбору технологий строительства подземных комплексов АСММ базируется на следующих принципах:

- технология строительства рассматривается как один из составных элементов сложной природно-технической геосистемы «подземное сооружение — породный массив — строительные технологии — окружающая среда», риск нарушения функционирования любого элемента которой может привести к нарушению функционирования всей системы;

- рациональное расположение горных выработок в массиве горных пород;
- использование несущих свойств скального массива;
- сохранение природных свойств вмещающего породного массива на всех этапах строительства и эксплуатации подземного комплекса.

Показано, что при строительстве 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:

- наличие многолетней мерзлоты;
- радиационное воздействие, способное изменять физико-механические свойства вмещающего массива и строительных конструкций;
- повышенный температурный режим внутри камерных выработок, который может оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние горных пород;

- знакопеременный температурный режим на контактах строительных конструкций и породного массива.

Установлено, что при строительстве подземных сооружений в многолетнемерзлых породах для снижения влияния знакопеременных температур необходимо использовать специальные технологии, к которым можно отнести:

- теплоизоляцию в различных средах;
- поддержание отрицательной температуры в породном массиве;
- искусственное охлаждение воздушной среды;
- принудительное замораживание пород при строительстве и в аварийных ситуациях;
- использование систем отвода тепла.

В рамках задачи по оценке технико-экономических показателей строительства определена ориентировочная стоимость горно-строительных работ для различного диапазона мощности подземных АСММ. С точки зрения экономических показателей подземные АС по стоимости строительства несколько дороже наземных атомных станций. Однако удорожание строительства подземных АС окупается их явным преимуществом по безопасности, а также снижением расходов на этапе вывода из эксплуатации. Ориентировочная технико-экономическая оценка показала, что удельные капитальные затраты на строительство АСММ с различными реакторными установками в значительной степени зависят от установленной мощности реактора. В соответствии с выполненными по укрупненным показателям расчетами показано, что удельные затраты (на единицу мощности) при снижении установленной мощности реактора существенно возрастают.

Литература к главе 5

1. Кокосадзе, А. Э. Особенности инженерных сооружений подземной энергетики / А. Э. Кокосадзе, С. А. Чесноков, В. М. Фридкин // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2013. Вып. 3. С. 56–72.

2. *Богданов, Ю. В.* Техничко-экономические проблемы и перспективы создания подземных атомных станций средней и малой мощности / Ю. В. Богданов, В. С. Тимченко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 3 (178). С. 71–81.
3. *Осипов, В. И.* Человек и литосфера / В. И. Осипов // Вестник АН СССР. 1990. № 8. С. 61–67.
4. *Чесноков, С. А.* Горно-технологические аспекты создания подземной энергетики / С. А. Чесноков // Горный журнал. 2010. № 11. С. 68–71.
5. Преимущества подземных АЭС. Текст : электронный. URL: <http://www.group74.ru/preimushchestva-podzemnykh-aes> (дата обращения: 03.03.2015).
6. *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.
7. Национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Конвенции о ядерной безопасности. Москва, 2007. 157 с.
8. СНиП 10-01-2003. Система нормативных документов в строительстве. Основные положения. Текст : электронный. URL: <https://rosexpertpravo.ru/law/Index2/1/4294813/4294813297.htm> (дата обращения: 10.03.2015).
9. НП 001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Москва : Госатомнадзор России, 1998. 39 с.
10. *Орлов, А. О.* Основные методические принципы обеспечения безопасности строительства подземных комплексов атомных станций малой мощности в условиях российской Арктики / А. О. Орлов, Ю. Г. Смирнов, С. А. Гусак // Изв. вузов. Горн. журн. 2017. № 5. С. 31–38.
11. *Орлов, А. О.* Обоснование эффективных способов размещения подземных комплексов атомных станций малой мощности в российской Арктике / А. О. Орлов, Ю. Г. Смирнов // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 4. С. 18–23.
12. 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.
13. *Кокосадзе, А. Э.* Конструктивно-технологические решения объектов подземной атомной энергетики малой мощности / А. Э. Кокосадзе // ГИАБ. 2011. № 4. С. 337–341.
14. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2013 г. № 599). Текст : электронный. URL: <https://minjust.consultant.ru/files/10526> (дата обращения: 15.11.2015).
15. Строительные нормы и правила. СНиП П-94-80. Нормы проектирования. Часть II. Подземные горные выработки : утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 31 декабря 1980 г. № 232). Москва, 1982. 36 с.
16. Проектирование и строительство подземных атомных станций / М. М. Мостков, А. П. Кириллов, Ю. Б. Николаев, В. Г. Богопольский. Москва : Информэнерго, 1985. 68 с.
17. НП-050-03. Размещение ядерных установок ядерного топливного цикла. Москва : Госатомнадзор России, 2003. 12 с.

18. Реакторная установка КЛТ-40, на примере данных по АЭУ лихтеровоза «СевМорПуть». Текст : электронный. URL: <http://www.nucon.us/archives/2950> (дата обращения: 20.02.2017).
19. Инновационные проекты атомных станций малой мощности для освоения месторождений и энергообеспечения других объектов арктических территорий России. Текст : электронный. URL: http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/4/7Pimenov.pdf (дата обращения: 09.02.2017).
20. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям для подземного гражданского и промышленного строительства. Москва : Стройиздат, 1987. URL: https://znaytovar.ru/gost/2/RekomendaciiRekomendacii_po_in.html (дата обращения: 04.02.2017).
21. Мельников, Н. Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве / Н. Н. Мельников, Ю. А. Епимахов, Н. Н. Абрамов. Апатиты : КНЦ РАН, 2008. 226 с.
22. Адамов, Е. О. Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания / Е. О. Адамов. Текст : электронный. URL: <http://innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf> (дата обращения: 06.10.2018).
23. Лазарев, И. А. Композиционное проектирование сложных агрегатных систем. Москва : Радио и связь, 1986. 312 с.
24. Бешелев, С. Д. Экспертные оценки в принятии плановых решений / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. Москва : Экономика, 2008. 256 с.
25. Орлов, А. О. Оценка конструктивно-компоновочных решений подземных комплексов для атомных станций малой мощности в арктических регионах России / А. О. Орлов, Ю. Г. Смирнов // Изв. вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 29–34.
26. Конухин, В. П. Ядерные технологии и экосфера / В. П. Конухин, В. Н. Комлев. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 330 с.
27. Картозия, Б. А. Методология проектирования строительства подземных сооружений как составная часть строительной геотехнологии / Б. А. Картозия, А. В. Корчак // Горный журнал. 2000. № 4. С. 5–8.
28. Картозия, Б. А. Шахтное и подземное строительство : учебник для вузов / Б. А. Картозия [и др.]. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГУ, 2003. Т. 2. 724 с.
29. Куликова, Е. Ю. Подземная геоэкология мегаполисов. Москва : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2005. 480 с.
30. Куликова, Е. Ю. Источники, виды и характер воздействия коммунальных тоннелей на окружающую среду / Е. Ю. Куликова // ГИАБ. 2004. № 4. С. 31–37.
31. Куликова, Е. Ю. Выработка критериев экологической безопасности применения технологий и способов строительства коммунальных подземных сооружений / Е. Ю. Куликова // ГИАБ. 2002. № 1. С. 49–52.
32. Освоение Крайнего Севера и подземное строительство. Текст : электронный. URL: <http://estp-blog.ru/rubrics/rid-17618/> (дата обращения: 10.02.2017).
33. СНиП 3.02.03-84. Подземные горные выработки : Утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства № 23 от 28 февраля 1985 г.). Текст : электронный. URL: http://www.tehnokniga.com/library/snip_245/ (дата обращения: 12.04.2019).

34. *Брушков, А. В.* Подземные хранилища в вечной мерзлоте: современное состояние / А. В. Брушков // Вестник Вавиловского общества генетиков и селекционеров (ВОГиС). 2008. Т. 12, № 4. С. 534–540.
35. Материалы и изделия, применяемые в теплоизоляционных конструкциях. Текст : электронный. URL: http://ngd091.ucoz.ru/_ld/1/140_Lektsia_5_Teplo.pdf (дата обращения: 24.10.2016).
36. Строительство АЭС. Текст : электронный. URL: http://energ2010.ru/Stati/Elektrostanciya/AES/Stroitelstvo_aes.html (дата обращения: 10.10.2016).
37. ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций. Текст : электронный. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842237.pdf> (дата обращения: 20.10.2016).
38. *Грев, Э.* Международный опыт строительства и эксплуатации тоннелей в условиях вечной мерзлоты. URL: <https://itk-mdl.asutk.ru/upload/iblock/62c/cusdpgkq%20wwil%20zqverijfhxicee%20c%20phggwpyu%20bfifwivinlov%20rukemiq.pdf> (дата обращения: 13.02.2017).
39. Подземные атомные станции — анализ безопасности, консервация и технико-экономические показатели строительства / Н. Н. Мельников, В. В. Гуцин, В. П. Конухин, В. А. Наумов. Апатиты : КНЦ АН СССР, 1989. 130 с.
40. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Текст : электронный. URL: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/vr-pravo/z2w.htm> (дата обращения: 26.02.2016).
41. ПИН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике. Текст : электронный. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293846/4293846843.pdf> (дата обращения: 25.10.2015).
42. *Ремнев, В. В.* Специальные цементы для возведения бетонных и железобетонных обделок тоннелей при отрицательной температуре / В. В. Ремнев. Текст : электронный. URL: http://www.ard-center.ru/home/publ/ts_1_2013/specement/ (дата обращения: 10.11.2016).
43. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов : межгосударственный стандарт. Минск, 1995. 12 с.
44. Искусственное замораживание грунтов. Текст : электронный. URL: http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/512/ (дата обращения: 15.12.2016).
45. Способ искусственного замораживания грунтов. Текст : электронный. URL: <http://vse-lekcii.ru/mosty-i-tonneli/stroitelstvo-tonnelej-i-metropolitenov/sposob-iskusstvennogo-zamorazhivaniya-gruntov> (дата обращения: 15.12.2016).
46. *Курилко, А. С.* Применение набрызг-бетонных теплозащитных покрытий в условиях криолитозоны / А. С. Курилко // ГИАБ. 2005. № 12. С. 147–152.
47. Теплоизоляция как способ управления деструкцией горных пород в устьевых частях подземных сооружений криолитозоны, вызванной знакопеременным температурным воздействием / Е. К. Романова, Ю. А. Хохолов, А. С. Курилко, А. Е. Местников // ГИАБ. 2012. № 9. С. 5–8.

48. *Шувалов, Ю. В.* Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны / Ю. В. Шувалов, А. Ф. Галкин // ГИАБ. 2010. № 8. С. 365–370.
49. *Климчук, И. В.* Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России / И. В. Климчук, В. М. Маланченко // Горная промышленность. 2007. № 4. С. 22–25.
50. *Галкин, А. Ф.* Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне / А. Ф. Галкин // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 99–102.
51. *Галкин, А. Ф.* Набрызг-бетонная теплозащитная крепь / А. Ф. Галкин, В. В. Киселев, А. С. Курилко. Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1992. 164 с.
52. *Башлыков, В. Н.* Специальные цементы для производства работ в зимнее время / В. Н. Башлыков, П. Н. Сиротин // Строительные материалы. 2010. № 2. С. 49–52.
53. Состав, технические характеристики и способы изготовления бетона с противоморозными добавками. Текст : электронный. URL: <http://stroyres.net/beton/c-protivomoroznyimi-dobavkami/sostav-harakteristiki-i-sposobyi-prigotovleniya.html> (дата обращения: 17.10.2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инновационное развитие арктических регионов России, о котором сейчас так много дискутируют, требует тесного взаимодействия государства, бизнеса и науки. В сферах, которые характеризуются недостаточной инвестиционной деятельностью, обязательным условием реальной инновационной политики является целенаправленная концентрация усилий государства. Именно к таким сферам следует отнести обеспечение энергетической безопасности удаленных и труднодоступных территорий в экстремальных природно-климатических условиях Арктики.

Главные цели, основные задачи, стратегические приоритеты и механизмы реализации государственной политики Российской Федерации в Арктике, а также система мер по стратегическому планированию социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации определены «Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». Во исполнение этого документа была разработана и утверждена Президентом РФ «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» (далее — Стратегия). Данный документ определяет основные механизмы, способы и средства достижения стратегических целей и приоритетов устойчивого развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности.

Характеризуя текущее состояние социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации, среди рисков и угроз Стратегия отмечает износ основных фондов энергетической инфраструктуры, высокую энергоемкость добычи природных ресурсов, неразвитость энергетической системы, нерациональную структуру генерирующих мощностей, высокую себестоимость генерации и транспортировки электроэнергии. Именно поэтому создание альтернативных источников энергии и модернизация энергетической инфраструктуры в арктических регионах страны рассматриваются в качестве приоритетных задач, решение которых направлено на достижение главных целей государственной политики Российской Федерации в Арктике.

Указанное приоритетное направление развития российской Арктики обуславливает реальные перспективы практического внедрения проектов АСММ в энергетические комплексы труднодоступных и удаленных территорий арктических регионов РФ, состояние энергетической инфраструктуры которых в наибольшей степени определяет объективную необходимость ее развития на основе использования источников энергии малой мощности. Вовлечение АСММ в местную и локальную энергетику может существенно улучшить перспективы этого сектора энергетики, в том числе в топливной структуре за счет сокращения потребления мазута и угля в производстве тепловой и электрической энергии.

В настоящее время в России разработано около 20 реакторных установок малой мощности, на основе которых могут быть созданы АСММ в широком энергетическом диапазоне для покрытия перспективных нагрузок потенциальных потребителей. Однако до сих пор нет опыта коммерческого освоения проектов АСММ и их практического использования в различных секторах энергетики. Этим во многом объясняется отсутствие достаточно полной информации

о технико-экономических характеристиках предлагаемых проектов АСММ, которые позволяли бы выполнить детально обоснованную оценку конкурентоспособности атомных энергоисточников.

Исследования ряда научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций позволили определить пороговые значения технико-экономических характеристик АСММ, при которых они могут быть конкурентоспособными по сравнению с традиционными источниками энергии, работающими на органическом топливе. Вместе с тем наличие целого ряда предложений по проектным разработкам РУ объективно обуславливает конкуренцию и между АСММ различного типа. В условиях ограниченного информационного обеспечения в настоящей работе на примере РУ трех типов (АБВ-6, «УниTERM», СВБР-10) выполнена предварительная сравнительная оценка их соответствия ограниченному числу рассмотренных критериев. На основе анализа приоритетов инвестиционной привлекательности и инвестиционных рисков альтернативных проектов установлена предпочтительность проекта АСММ с РУ АБВ-6.

Использование АСММ в качестве автономных источников энергии и необходимость их приближения к потребителям энергии, особенно в удаленных и труднодоступных районах, обуславливают дополнительные требования по снижению рисков радиационного воздействия атомных энергоисточников на окружающую среду и население. В совокупности с барьерами безопасности, которые предусматриваются в современных разработках реакторных установок, комплексная безопасность, включая локализацию последствий аварий, решение задачи физической защиты и защиты от внешних воздействий техногенного и природного характера, может быть гарантированно обеспечена при подземном размещении реакторных установок.

Подземное размещение АСММ требует тщательного изучения геологических, инженерно-геологических, гидрогео-, сейсмологических и иных природных характеристик площадки размещения атомной станции. Значительный опыт по формированию и использованию критериев оценки площадок для размещения радиационно опасных объектов в последнее десятилетие выработан в России, в частности Горным институтом КНЦ РАН.

Критерии оценки площадок для размещения АСММ в криолитозоне в значительной степени носят чисто технический характер. К площадкам предъявляются следующие требования:

- удаленность от тектонических разломов на расстояние не менее 1 км;
- состав из преимущественно из однородных массивов скальных или твердомерзлых осадочных пород;
- отсутствие карстов, таликов, надмерзлотных и межмерзлотных вод;
- размещение в зоне с постоянной, не изменяющейся в течение года отрицательной температурой (в зоне нулевых годовых амплитуд);
- прочностные свойства пород должны обеспечивать устойчивость горных выработок АСММ в течение всего периода строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации.

Выбор и оценка площадки для размещения АСММ в районе конкретного потенциального потребителя энергии предполагает поэтапное принятие решений, включающее:

- идентификацию возможных площадок в зоне размещения потребителей;
- определение критериев оценки сравниваемых площадок;
- определение перечня и оценку возможных воздействий создаваемого энергетического объекта на окружающую среду.

В качестве базовых исходных данных при проектировании и строительстве АСММ, предназначенных для энергообеспечения горнопромышленных предприятий, например, могут быть использованы результаты инженерно-геологических изысканий, выполненных при изучении конкретных месторождений полезных ископаемых.

Создание подземного атомного энергетического объекта обуславливает необходимость разработки специальной программы исследований на площадке по оценке условий размещения АСММ, которая формируется в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии по учету внешних воздействий природного и техногенного происхождения на радиационно опасные объекты. В частности, должны быть изучены:

- гидрометеорологические процессы и явления;
- геологические и инженерно-геологические процессы и явления, включая землетрясения любого генезиса и деформации специфических грунтов (карст, термокарст, разжижение, солифлюкция, суффогенные процессы);
- факторы внешнего воздействия техногенного происхождения, включая падение летательных аппаратов, аварии на близлежащих промышленных объектов и прорывы естественных или искусственных водохранилищ.

По результатам исследований определяется степень опасности каждого процесса, явления и фактора и формируется в целом база научных данных по площадке, достаточная для принятия технических и организационных решений по АСММ.

В настоящей работе рассмотрены методологические основы выбора площадок для размещения подземных АСММ в приповерхностных геологических формациях с учетом горно-геологических, горнотехнических и социально-экономических факторов. На примере Томторского месторождения ниобий-редкоземельных руд в Якутии и медно-порфирирового месторождения «Песчанка» на Чукотке выполнена оценка потенциальных площадок для размещения АСММ в скальных породах при создании новых горнопромышленных предприятий. Результаты исследований по выбору конкретных площадок позволили сделать вывод о том, что на месторождении «Томтор» наиболее пригодно заглубленное (котлованное) размещение подземного комплекса АСММ, а для атомного энергоисточника на месторождении «Песчанка» выбраны площадки для штольного расположения энергетического объекта.

При эксплуатации подземного комплекса АСММ неизбежно возникают процессы теплового взаимодействия подземных сооружений с породным массивом. Значение этого фактора подтверждается, в частности, опытом эксплуатации единственной в нашей стране подземной атомной станции на Красноярском горно-химическом комбинате, который показал, что неучет теплового фактора даже при нормальной эксплуатации может приводить к ошибкам в прогнозировании напряженно-деформированного состояния породного массива и условий работы ограждающих конструкций. Наиболее

сложный механизм взаимодействия подземных сооружений с породным массивом проявляется в условиях криолитозоны. Оттаивание массива ММГП под воздействием температурного режима эксплуатации подземной АСММ может приводить к изменению физико-механических свойств пород, активизации геомеханических процессов и потере устойчивости подземных выработок.

Возможные криогенно-технологические осложнения, обусловленные тепловым фактором, определяют актуальность изучения особенностей теплового взаимодействия подземных сооружений с мерзлыми породами как одной из приоритетных научно-технических задач в рамках междисциплинарных исследований по обоснованию методологии создания подземных комплексов для размещения АСММ в условиях Арктики. В настоящей монографии представлены основные результаты изучения влияния конструктивно-компоновочных и объемно-планировочных решений подземного комплекса АСММ на тепловое взаимодействие подземных выработок с массивом ММГП с учетом фазового перехода «лед — вода» в породном массиве.

В рамках изучения влияния объемно-планировочных решений проведены численные эксперименты в трехмерной постановке, целью которых, в частности, являлась оценка теплового состояния ММГП (при различном расстоянии между подземными модулями) и пористости вмещающего породного массива. По результатам этих исследований установлено влияние этих параметров на продолжительность и определены условия сохранения криогенного состояния породного целика между подземными сооружениями.

Другим целевым назначением исследований влияния объемно-планировочных решений являлась оценка области оттаивания криолитозоны при эксплуатации подземной многомодульной АСММ. На базе разработанной трехмерной математической модели выполнены расчетные исследования, по результатам которых установлены закономерности оттаивания ММГП при вариации теплопроводности обделки горных выработок и пористости горной породы. Для модели с минимальной теплопроводностью обделки (0,05 Вт/(м·К)) получены аппроксимации, устанавливающие зависимость объема оттаявшей породы и скорости изменения этого объема от продолжительности теплового воздействия при различной пористости горной породы. Эти зависимости с высокой степенью достоверности (0,998) хорошо описываются посредством квадратичных функций с коэффициентами аппроксимации для соответствующего значения пористости ММГП.

На изучение особенностей влияния конструктивно-компоновочных решений, связанных с размерами подземных модулей, были направлены расчетные исследования влияния площади основания горных выработок на глубину оттаивания криолитозоны. Результаты исследований, выполненных в объемной постановке на примере модельных представлений подземных модулей реакторного и турбинного отделений АСММ с реакторами АБВ-6 и СВБР-100, позволили сделать вывод о нелинейной зависимости глубины оттаивания криолитозоны от площади основания модулей. Эта зависимость с коэффициентом достоверности не ниже 0,969 аппроксимируется логарифмической функцией с различными коэффициентами аппроксимации для определенной продолжительности теплового воздействия на породный массив в интервале от 5 до 20 лет.

Результаты исследований теплового взаимодействия АСММ с массивом ММГП показывают, что даже в условиях нормальной эксплуатации подземного атомного объекта прогнозируется оттаивание мерзлых пород, которое может приводить к развитию криогенно-технологических осложнений. На основе компьютерных моделей, реализованных в двухмерной постановке, выполнены расчетные оценки эффективности использования возможных инженерных систем для сохранения криогенного состояния ММГП на примере двух схем искусственного замораживания породного массива: система замораживания в приконтурной зоне массива и встроенная в обделку подземного модуля системы труб охлаждения. По результатам численного моделирования установлено, что применение рассмотренных систем замораживания позволяет обеспечить стабильное состояние ММГП. В частности, для варианта со встроенной в обделку модуля системы труб охлаждения определены параметры (количество и размеры труб, температура хладоносителя), при которых может быть обеспечено криогенное состояние приконтурной зоны породного массива.

С точки зрения экологических аспектов эксплуатации АСММ еще одним важным фактором теплового воздействия является влияние системы отвода тепла от конденсаторов турбогенераторов станции на окружающую среду. В рамках изучения данной проблемы выполнены расчетные исследования теплового воздействия АСММ на водоем-охладитель. Целью этих исследований являлась расчетная оценка зависимости температуры водоема-охладителя от площади его поверхности и тепловой мощности РУ АСММ, которая выполнялась на примере метеорологических условий в районе Томторского редкометалльного месторождения руд при принятых значениях КПД станции в диапазоне 20–35 %.

Результаты расчетов, выполненных с использованием методики специалистов ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», позволили определить площади поверхности водоема-охладителя, при которых выполняется условие неперевышения подогрева воды на 0,5 °С, который не оказывает значительного влияния на гидрохимический и гидробиологический режим природного водоема. На основе обобщения расчетных данных для рассмотренного мощностного ряда АСММ от 0,5 до 100 МВт получена линейная аппроксимация функции, которая позволяет выполнять прогнозные оценки минимально необходимой площади поверхности водоема-охладителя в зависимости от мощности АСММ.

Несомненно, радиационное воздействие АСММ на окружающую среду является важнейшим фактором, определяющим экологические аспекты эксплуатации атомно-энергетического объекта. В настоящей работе на примере АСММ с РУ КЛТ-40С для потенциальной площадки в районе месторождения «Песчанка» выполнены оценки радиационного воздействия на население и природную среду при аварийном атмосферном выбросе. По результатам оценки установлено, что размеры санитарно-защитной зоны, на границах которой выполняется требование неперевышения допустимой дозы для населения при запроектной аварии, не превысят размеров промышленной площадки АСММ. При этом при отсутствии эффекта экранирования близлежащих зданий высота вентиляционной трубы может быть существенно снижена (до ~ 20 м).

Неотъемлемым элементом технологического процесса при эксплуатации атомной станции любого типа является обращение с отработавшим ядерным топливом. В основу государственной политики РФ в области обращения с ОЯТ положен принцип переработки облученного топлива для обеспечения

экологически приемлемого обращения с продуктами деления и возврата в ядерный топливный цикл регенерированных ядерных материалов. В особых случаях, связанных с большой удаленностью атомной станции, с отсутствием адекватной транспортно-технологической инфраструктуры или технологии переработки отдельных видов ОЯТ, рассматривается вариант долговременного промежуточного хранения топлива с отсрочкой на будущее принятия решения об окончании топливного цикла. Примером такого варианта обращения с ОЯТ является хранилище контейнерного типа на территории ФГУП «Атомфлот», предназначенное для хранения сроком до 50 лет неперерабатываемого в настоящее время уран-циркониевого топлива атомного ледокольного флота.

В настоящей работе представлены результаты исследований различных аспектов безопасности при эксплуатации хранилища ОЯТ реакторов АСММ, выполненных на основе концепции длительного сухого хранения ОЯТ в подземном хранилище контейнерного типа с использованием двухцелевых (хранение и транспортировка) контейнеров типа ТУК-120, которые применяются для хранения неперерабатываемого топлива атомного ледокольного флота.

На основе анализа информации по проектам РУ малой мощности разработаны математические модели топливных циклов корпусных водородных реакторов и жидкометаллических реакторов АСММ. С помощью разработанных моделей изучены изотопные составы активных зон, определены массы актиноидов и долгоживущих продуктов деления, альфа- и бета-активности облученного топлива, оценены полные активности ОЯТ активных зон реакторов АСММ. Результаты исследований позволили обосновать вывод о возможности применения технологической схемы обращения с ОЯТ судовых реакторов-прототипов к реакторам АСММ.

В рамках обоснования ядерной безопасности выполнены расчетные исследования нейтронно-физических процессов в контейнере ТУК-120. Их результаты исследований позволили определить количество ТВС, размещаемых в контейнере, при котором обеспечивается ядерная безопасность для состояний нормальной эксплуатации и аварийного обводнения при разгерметизации крышек контейнера и чехлов с ОЯТ.

Исследования радиационной безопасности хранилища ОЯТ базировались на разработанной математической модели переноса ионизирующих излучений (нейтронов спонтанных делений и гамма-квантов) в биологической защите контейнера ТУК-120. На основе методов компьютерного моделирования определены дозовые параметры поля ионизирующих излучений вблизи контейнеров с ОЯТ реакторов АСММ различного типа. При этом установлено, что величина мощности эффективной дозы в основном определяется гамма-излучением продуктов деления ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{154}Eu и прогнозируемые дозовые нагрузки на персонал находятся в пределах нормативных требований по радиационной безопасности.

В рамках исследований тепловой безопасности хранилища ОЯТ изучены основные закономерности формирования мощности источников тепла, развивающейся в облученном топливе после останова ядерного реактора. Установлено, что при выдержке ОЯТ, равной или больше продолжительности топливного цикла, характерной для активных зон реакторов АСММ, формирование источников тепла определяется смесью продуктов деления и актиноидов. По мере увеличения времени выдержки ОЯТ повышается вклад

альфа-распада актиноидов в суммарную величину МОЭ. Установленные различия в относительном вкладе актиноидов в суммарную величину остаточного энерговыделения ОЯТ реакторов различного типа обусловлены изотопным составом топлива, который, наряду с энерговыработкой активных зон и временем выдержки топлива, в значительной степени определяется особенностью спектра плотности потока нейтронов, характерного для жидкометаллических и водородных реакторов.

На основе разработанной трехмерной модели одиночного контейнера ТУК-120 с ОЯТ реакторов малой мощности изучены особенности формирования температурного режима контейнера в условиях свободной конвекции на его боковой поверхности. Результаты выполненных исследований позволяют сделать предварительный вывод о том, что интенсивность свободно-конвективного теплообмена может обеспечить отвод остаточных тепловыделений при соблюдении нормативных требований по тепловой безопасности сухого хранения контейнеров с ОЯТ из реакторов АСММ различного типа, рассмотренных в настоящей работе.

Создание подземных комплексов для размещения АСММ в сложных климатических и инженерно-геологических условиях Арктики обуславливает постановку комплексной научно-технической задачи, связанной, в частности, с определением архитектуры комплексов, безопасных способов и технологий строительства. Комплексный характер этой задачи определяется основной идеей подземного размещения АСММ, которая заключается в использовании защитных и изолирующих свойств породного массива, позволяющих в сочетании с инженерными защитными барьерами противостоять любому внешнему природному и техногенному воздействию и обеспечить локализацию возможных внутренних инцидентов. Достижение этой цели определяет актуальность проблемы обеспечения надежного и безопасного функционирования природно-технической геосистемы «массив горных пород — технология строительства — подземное сооружение» как совокупности взаимодействующих природных и техногенных подсистем, в которой подземный комплекс АСММ характеризуется параметрами, описывающими функциональное назначение горных выработок, и формирует требования к характеристикам вмещающего массива.

Анализ опыта строительства и эксплуатации подземных объектов различного назначения и международной патентной базы данных в области создания подземных АЭС послужил основой для разработки системы критериев для обоснования технологических решений при создании подземных комплексов АСММ, обеспечивающих устойчивость и долговечность горных выработок и строительных конструкций в условиях криолитозоны. В структуре факторов, определяющих выбор конструктивно-компоновочных решений с учетом комплексного характера требований, можно выделить четыре основных взаимосвязанных составляющих:

1) горно-геологические условия, определяющие требования при выборе площадок для размещения подземной АСММ;

2) технические характеристики подземного комплекса, которые отражают конструктивные и эксплуатационные параметры реакторных установок и конструктивно-компоновочные параметры подземных выработок;

3) технологические параметры строительства, характеризующие технические особенности и экономические показатели строительства подземного комплекса;

4) блок обеспечения безопасности, в котором интегрированы риски при проведении горно-строительных работ и при эксплуатации всех элементов подземного комплекса.

Большое разнообразие возможных проектных решений подземных комплексов обусловило выполнение оценки их рациональности, в рамках которой рассмотрены наиболее характерные схемы визуализированных моделей, объединенные в группы по принципу взаимного расположения основных камерных выработок: схемы с последовательным, параллельным и смешанным расположением выработок. Результаты оценки позволяют сделать вывод о предпочтительности применения смешанного расположения основных камерных выработок и их компоновки по функционально-технологическому принципу работы, которые характеризуются высокой концентрацией оборудования и представляются наиболее безопасными.

По результатам выполненных исследований разработаны концептуальные положения по обоснованию технологии строительства подземных АСММ, которые базируются на следующих основных принципах:

- технология строительства рассматривается как один из составных элементов сложной природно-технической геосистемы, риск нарушения функционирования любого элемента которой может привести к нарушению функционирования всей системы;
- рациональное расположение горных выработок в массиве горных пород;
- использование несущих свойств скального массива;
- сохранение природных свойств вмещающего породного массива на всех этапах строительства и эксплуатации подземного комплекса.

Для предотвращения возможных криогенно-технологических осложнений, обусловленных особенностями теплового взаимодействия подземного комплекса АСММ с массивом ММП, необходимо использовать специальные технологии, к которым можно отнести:

- теплоизоляцию в различных средах;
- поддержание отрицательной температуры в породном массиве;
- искусственное охлаждение воздушной среды;
- принудительное замораживание пород при строительстве и в аварийных ситуациях;
- использование систем отвода тепла.

Очевидно, что выбор параметров геотехнологии при создании подземного комплекса АСММ в значительной мере определяет экономическую эффективность атомного энергетического объекта, которая оказывает непосредственное влияние на его конкурентоспособность. В настоящей работе выполнена сравнительная оценка технико-экономических показателей строительства подземных АСММ с РУ различного типа с учетом параметров, имеющих наибольший удельный вес при строительстве объекта: объем вынимаемой горной породы, количество укладываемого бетона на крепление и возведение различных конструкций, расход металла и теплоизоляционных материалов, используемых при сооружении

горных выработок. В конструкциях подземного комплекса рассматривалось вскрытие горизонтальными выработками при различных компоновочных схемах основных и вспомогательных выработок. В зависимости от мощности РУ оценивались схемы с последовательным и параллельным расположением камерных выработок, а также со смешанной компоновкой главных камерных выработок и кольцевой транспортной схемой. Результаты этой оценки показали, что основная доля капитальных затрат (70–80 %) приходится на проходку горных выработок подземного комплекса. При этом удельные капитальные затраты (руб/кВт) на горно-строительные работы для подземной АСММ снижаются при увеличении мощности реакторной установки.

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

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

Основное значение придается факторам, связанным с обоснованием технологии, способов, методов организации и управления горно-строительными работами. Осуществляется оценка рисков при строительстве и эксплуатации.

При обобщении результатов выполненных исследований следует отметить, что они служат методологической основой для дальнейшего развития исследований, направленных, в частности, на оценку взаимовлияния и взаимосвязей между элементами природно-технической геосистемы. Решение этой задачи является неотъемлемым этапом разработки научно обоснованных рекомендаций, направленных на обеспечение надежности, безопасности и эффективности реализации инженерно-технических и технологических решений по созданию подземных комплексов АСММ в условиях криолитозоны арктических регионов.

ISBN 978-5-91137-405-1



9 785911 374051

