2 (15) май 2015 г.
Специальный выпуск

НАУКА И БЕЗОПАСНОСТЬ

Science and Safety

Ежеквартальный научный журнал

Специальный выпуск посвящен проведению Круглого стола «Строительство, реконструкция и безопасная эксплуатация морских и речных портов и гидротехнических сооружений» в рамках деловой программы V Международного форума «Морская индустрия России», 20 мая 2015 г. г. Москва

АНО "НИИ "ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ"
НИИ ПБ
г.Магнитогорск

ISSN 2225-0360

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеева Е.Л.
ООО «ВЕЛД», кандидат технических наук

Баталин Б.С.
Пермская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.Н. Прянишникова, действительный член Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) и действительный член Российской Академии Естествознания, доктор технических наук, профессор

Ерёмин А.К.
ООО «ВЕЛД», кандидат технических наук

Клюев В.В.
Ассоциация производителей диагностической техники НО «СПЕКТР-ГРУПП», доктор технических наук, профессор, академик РАН

Кудрявцев А.П.
РААСН, профессор, кандидат архитектуры

Махутов Н.А.
Научно-промышленный союз «РИСКОМ» член-корреспондент РАН

Нащекин М.В.
ООО «ВЕЛД», кандидат технических наук

Пермяков М.Б.
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктор PhD, кандидат технических наук

Пономарев В.Н.
ТП «Комплексная безопасность промышленности и энергетики», ИБРАЭ РАН по стратегическому развитию и инновациям, доктор физико-математических наук, профессор

Сенин С.Н.
Московский государственный строительный университет, кандидат технических наук

Теличенко В.И.
Московский государственный строительный университет, действительный член РААСН, доктор технических наук, профессор

СОДЕРЖАНИЕ

Кантаржи И.Г., Мордвинцев К.П.
Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений **2**

Левачев С.Н., Кантаржи И.Г.
Исследования и проектирование портовых сооружений порта Певек **17**

Спиридонов А.В.
Энергосбережение и энергоэффективность при строительстве и реконструкции зданий и сооружений морских портов **34**

Струев В.П., Кудинович И.В., Кучин Н.Л., Дульнев А.И., Нестеров А.Б., Рязанцева О.В., Шедько С.В., Шкляров Н.В., Болгаров С.П.
Анализ безопасности АЭУ плавучего энергоблока при внешних воздействиях **49**

Струев В.П., Малышев С.П.
Проблемы обеспечения экологической безопасности арктических акватории, островов и прибрежных территорий **63**

Билашенко В.П., Сотников В.А.
Действия, направленные на реабилитацию арктического региона от затопленных ядерно- и радиационно-опасных объектов **75**

Беккер А.Т., Ким Л.В.
Безопасность шельфовых сооружений при воздействии дрейфующих ледяных образований **79**

Умнякова Н.П.
Влияние коэффициента излучения офольгированных материалов на теплопередачу через наружные ограждения **89**

Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н.
Универсальные жилые здания из конструкций заводского изготовления **95**

Авторы номера **100**

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МГСУ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 551.46.09, 551.466.4

Кантаржи Игорь Григорьевич
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», доктор технических наук, профессор

Мордвинцев Константин Петрович
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», кандидат технических наук, профессор

АННОТАЦИЯ

Проектирование безопасных морских гидротехнических сооружений, включая сооружения морских портов, требует комплексного применения методов натурных измерений, физического и численного моделирования. В МГСУ в течение ряда лет ведутся исследования гидротехнических комплексов проектируемых морских портов. МГСУ располагает лабораторией, позволяющей изучать нагрузки и воздействия от ветровых волн на оградительные, причальные, берегозащитные сооружения. Для численного моделирования используется моделирующий программный комплекс, позволяющий исследовать следующие процессы: ветроволновые процессы на подходе к сооружению, взаимодействие волн с сооружениями, низкочастотные колебания в портовых акваториях, развитие ледовых полей на подходе и при взаимодействии с сооружениями, потоки твердого материала и переформирование дна и берегов, циркуляция и поля течений, водообмен и распространение примесей. Представлены возможности экспериментальной лаборатории и комплекса численного моделирования. Обобщен опыт последних лет комплексных исследований морских гидротехнических сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Морские порты, Гидротехнические сооружения, Физическое моделирование, Экспериментальная лаборатория, Численное моделирование, Программный комплекс, Опыт исследований

Введение. Методы определения внешних нагрузок для портовых сооружений

Безопасность проектирования портовых гидротехнических сооружений в значительной степени зависит от правильного определения внешних нагрузок, основными из которых являются волновые нагрузки и ледовые.

Требуется оценить расчетные характеристики следующих волновых процессов:

- расчетные параметры волн у сооружений для определения волновых нагрузок на конструкции сооружений и высоты волнового заплеска для определения отметок гребня конструкций;
- размеры волн на акватории порта и у причалов для оценки безопасности швартовки расчетных судов в порту и выполнения маневров;
- резонанс гавани на входящее волнение и характеристики длиннопериодных колебаний на акватории для оценки тягуноопасности порта;
- волновые течения на акватории порта и в прилегающей к порту береговой зоне для оценки литодинамических процессов, заносимости акватории и подходного канала, влияния портовых сооружений на эрозионные береговые процессы;
- течения на акватории порта и водообмен между акваторией и морем для обеспече-

ния качества морской воды в акватории порта.

Даже в тех случаях, когда порт проектируется в климатических условиях, когда основной нагрузкой на оградительные сооружения является ледовая нагрузка, прогноз волн необходим для проектирования конструкций причальных сооружений, условий швартовки судов у причалов, литодинамических процессов и эволюции качества воды.

Для определения характеристик волн и перечисленных волновых процессов используются различные методы:

Натурные измерения волн на подходе к проектируемому порту. К сожалению, имеется чрезвычайно ограниченное количество пунктов, где в течение ряда лет проводятся измерения волн. Так, в береговой зоне Черного моря имеются только два таких пункта: волномерный буй в районе г. Геленджик [1] и волноизмерительная станция (ВИС) в районе г. Сочи. Данные по волномерному бую имеются для периода 1996-2003 гг., глубина его установки – 85 м. В последнее время разработаны достаточно надежные методики натурного измерения волн с помощью донных датчиков давления и методы восстановления характеристик поверхности по этим измерениям [2, 3].

Расчетные методы. Расчетные методы основаны на использовании упрощенных зависимостей, как правило, с теоретической основой и эмпирическими поправками, для оценки параметров волн. В частности, компенсируя отсутствие многолетних измерений волн для площадки строительства, применяют имеющуюся у ГМС многолетнюю статистику ветра по ближайшим станциям. По этой статистике строятся функции обеспеченности скорости ветра, определяется расчетная скорость ветра, соответствующая классу сооружения и далее оцениваются расчетные параметры волн. В частности, такие методы включены в Приложение 1 «Элементы волн на открытых и огражденных акваториях», входящем в СНиП 2-06-04-82*. В этом приложении собраны методы определения расчетных уровней воды, расчетных характеристик ветра, элементов волн в глубоководной зоне, элементов волн в мелководной зоне, элементов волн в прибойной зоне и элементов волн на огражденной акватории. При применении этих и подобных методов нужно иметь в виду следующее. Условия расчета волн для различных площадок проектирования существенно отличаются друг от друга. Разная батиметрия дна, различные конфигурации и экспозиции береговой линии, разный характер ветрового поля. Трудно ожидать, что при разработке метода расчета элементов волн на глубокой воде, который включает ограниченный набор волнообразующих факторов: расчетная скорость ветра; время разгона; глубина вдоль разгона; длина разгона, можно учесть все многообразие конкретной площадки.

Имеющийся метод расчета пригоден для «идеальных условий волнообразования». Под идеальными условиями волнообразования «понимают такие условия, при которых ветер постоянной скорости действует на поверхность водоема в направлении, перпендикулярном к подветренной прямолинейной береговой черте; при этом глубина водоема должна быть постоянной или не влиять на развитие волн» [4]. В случае условий волнообразования, отличных от идеальных, а так бывает всегда на практике, предлагаемые в СНиП методы расчета элементов волн на глубокой воде позволяют получить только оценочные значения.

Для уточнения параметров волн, воздействующих на портовые сооружения, используется **метод физического моделирования**. Метод физического моделирования применительно к портовым сооружениям позволяет не только исследовать волновые поля, но и непосредственно изучать взаимодействие волн с проектируемыми гидротехническими сооружениями. Как правило, применяется 3D-моделирование в волновых бассейнах в уменьшенных масштабах в диапазоне, примерно, 1:20 – 1:100. Моделирование в волновых лотках (2D-модели) обычно является вспомогательным для проверки устойчивости, например, защитного откосного покрытия.

Физическое моделирование требует выполнения критериев динамического подобия модели и натурного объекта. Для портовых гидротехнических сооружений моделирова-

ние удается чаще всего выполнять по критерию Фруда.

Физическое моделирование взаимодействия волн с сооружениями ограничено размерами моделируемых сооружений, особенно портовых оградительных сооружений, и размерами бассейнов. В некоторых случаях применяют моделирование с искажением горизонтального и вертикального масштабов.

Физическое моделирование волн и взаимодействия волн с сооружениями, в существенной части компенсирует отсутствие данных натурных измерений волн для площадки проектирования.

Численное моделирование волн и взаимодействия волн с портовыми сооружениями. Метод численного моделирования предполагает формулирование краевой задачи математической физики и разработку численного решения этой задачи. Этот метод активно развивается в последнее время и используется для решения задач по определению волновых нагрузок и воздействий на портовые гидротехнические сооружения.

В случае проектирования сооружений, подверженных волновому воздействию, использование расчетных методов из Приложения 1 к СНиП 2.06.04-82* возможно только для относительно простых условий и требует специального обоснования. Использование этих методов в других случаях приводит к невозможности определить степень достоверности расчетных параметров ветровых волн.

В МГСУ при исследованиях портовых сооружений используются все существующие методы в комплексе.

Для ледовых нагрузок проблема их определения для целей проектирования портовых сооружений похожа на волновую ситуацию, хотя здесь имеются свои особенности, обсуждаемые в [5-8].

Лаборатория морских сооружений МГСУ

Для физического моделирования портовых сооружений и экспериментальных исследований используются возможности лаборатории гидротехнических сооружений [9].

Лаборатория располагает следующими основными установками: большой мелководный бассейн, волновой лоток, глубоководный волновой лоток, глубоководный бассейн, большой грунтовый лоток, малый грунтовый лоток, климатическая камера объемом 2 м^3.

Изучение волнового воздействия на сооружения в лабораторных условиях проводится в волновых лотках на двухмерной модели (плоская задача) и в волновых бассейнах на трехмерной модели (пространственная задача). В случае пространственного моделирования в исследование вводятся в полной доступной мере все три измерения исследуемого объекта: его высота, ширина и третье измерение, например, профиль берега и его ориентировка по отношению к лучу волны при разных нефронтальных подходах ее к береговой черте, в частности воспроизводится полностью весь действительный рельеф берега и дна моря.

Для гидравлических лабораторий характерны два типа бассейнов – с постоянным направлением генерируемого волнения и с изменяемым направлением волнения.

В НИЛ «ГС» волновой бассейн оборудован двумя волнопродукторами первого типа. Бассейн в плане имеет вид прямоугольника (27×27 м), вблизи одной из стенок которого стационарно устанавливался волнопродуктор. У противоположной от волнопродуктора стенки под заданным углом строилась исследуемая пространственная модель.

Для создания волн в НИЛ «ГС» применяются щитовые волнопродукторы, генерирующие регулярные волны. В процессе создания регулярных волн обеспечивается постоянство частоты и амплитуды движения волнообразующих тел, осуществляющегося посредством электромеханического привода (рис.1).

В волновом лотке лаборатории волнопродуктор установлен неподвижно с целью изучения устойчивости участков конструкции гидротехнических сооружений на плоской модели (рис.2). На пространственных моделях при проведении лабораторных исследований с различным углом подхода штормовых волн к испытываемым сооружениям применяется передвижной волнопродуктор, избавляющий от необходимости при изменении подхода волн к сооружению изменять его ориентацию относительно направления распространения волн.

Рис.1. Волнопродуктор типа «качающегося щита» в волновом бассейне

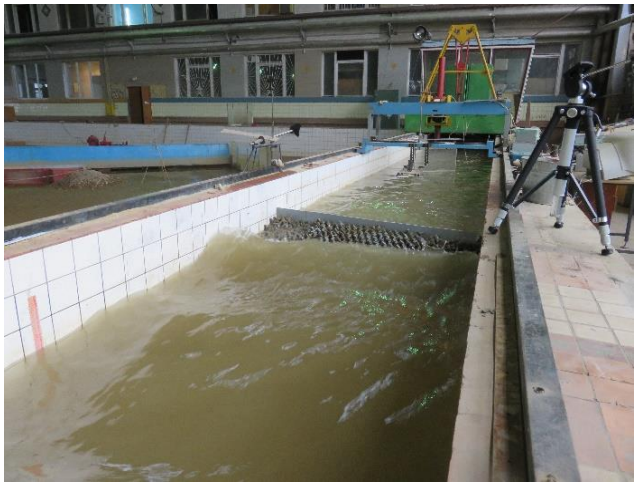


Рис.2. Эксперименты в волновом лотке

При лабораторном изучении волнового воздействия на сооружения основными измеряемыми величинами являются:
- средний уровень воды в лотке или бассейне;
- параметры волн;
- давление;
- скорость течений;
- профиль размываемого берегового склона.

Уровень свободной поверхности достаточно точно (до +0,2 мм) может быть измерен с помощью контактного датчика, который состоит из иглы, присоединенной к нижнему концу штанги, перемещающейся в вертикальном направлении. В исследованиях с изменяющимся во времени уровнем свободной поверхности применяются уровнемеры с непрерывной регистрацией (рис.3).

Измерение давления в лабораторных условиях осуществляется с помощью датчиков с упругими чувствительными элементами. В данной работе применялись пьезометрические датчики с упругими элементами в виде колец.

Рис.3. Датчик-волнограф в рабочем положении

При лабораторных исследованиях воздействия волн на берега морей, сложенных песками (со средней крупностью грунта 0,1-1,0 мм), в качестве наносов рекомендуется применять натурный песок.

При исследовании распространения волн на акватории порта принимается высота волн 5% обеспеченности, а при изучении воздействия волн на защитные оградительные сооружения принимается высота волн 1% обеспеченности.

Общая продолжительность расчетного волнения определяется в зависимости от гид-

рометеорологической обстановки в заданном районе.

После определения расчетных параметров волн проектируется и строится модель.

Основной линейный масштаб модели (вертикальный) выбирается равным масштабу высоты волн в зависимости от размеров экспериментальных площадок и размеров моделируемого участка берега. Модели рекомендуется изготавливать смешанного типа: мористую часть до зоны движения наносов с жестким дном, а прибрежную часть – из размываемого материала, отсыпаемого на горизонтальную площадку с жестким покрытием.

Исходным материалом для проектирования физических моделей являются: плановая топографическая, гидрологическая, литологическая и геологическая съемки прибрежной зоны исследуемого участка в масштабе 1:500-1:5000 с промерами глубин до 20 м и данные многолетних наблюдений ближайших волномерных постов.

Последовательность проектирования моделей такова:

- по результатам численного моделирования определяются расчетные параметры волн (направление, высота, период), продолжительность волнения и уровень воды;
- в зависимости от решаемой задачи и размеров экспериментальных установок устанавливается масштаб высоты и длины расчетных волн и масштабы модели;
- в соответствии с выбранными масштабами вычерчивается план модели с изобатами через 0,5-1,0 м с учетом размещения модели и необходимых площадок и устройств в волновом лотке или бассейне;
- вычерчиваются поперечные профили берегового склона моделируемого участка (в зависимости от рельефа берегового склона расстояние между поперечниками на модели выбирают от 0,5 до 2 м);
- определяются участки размываемого и не размываемого подводного берегового склона;
- в соответствующем масштабе проектируются модели сооружений, имеющиеся на исследуемом участке и намечаемые для строительства;
- выбирается расположение экспериментального оборудования и измерительных приборов, необходимых для проведения исследований (передвижных волнопродукторов, направляющих стенок, гасителей волн, волнографов, датчиков давления и др.).

Изготавливаются и устанавливаются модели сооружений. Под расчетным углом к линии берега устанавливаются волнопродукторы (если они передвижные) и направляющие боковые стенки.

С целью изучения гидравлических и литодинамических процессов с помощью фотосъемки на неразмываемой части модели может наноситься координатная сетка, а на размываемой устанавливаются неподвижные маячки.

По окончании строительства модели производится подбор волнового режима. После подбора волнового режима восстанавливается исходный береговой склон, устанавливаются необходимые измерительные приборы и оборудование и выполняются основные опыты.

Численный комплекс исследований волновых и ледовых процессов

Для численных исследований портовых сооружений в МГСУ используется COASTOX-MORHO – программный комплекс моделирования волн, течений, транспорта наносов, заносимости и размывов дна в прибрежной зоне моря, разработанный в Украинском центре экологических и водных проектов [10, 11].

COASTOX-MORHO – это программная система, предназначенная для решения двумерных уравнений распространения волн, формирования течений, транспорта наносов, размывов дна и берегов на основе высокопроизводительных численных алгоритмов. Используются методы конечных объемов на неструктурированных сетках, алгоритмы параллелизации для расчетов на многопроцессорных и/или многоядерных системах. Система может использоваться для расчетов на персональных компьютерах и многопроцессорных кластерах. Дополнительные модули системы позволяют рассчитывать перенос загрязнений (токсические элементы и радионуклиды) в прибрежной зоне моря. Специализированные модули COASTOX-LU и

COASTOX-LU-B позволяют рассчитывать корабельные волны, генерируемые крупнотоннажными кораблями (модуль LU) и быстроходными небольшими катерами (модуль LU-B) в узостях, проливах и прибрежной зоне.

В базовой конфигурации программный комплекс COASTOX-M-12 может быть использован для решения следующих прикладных задач:

- Расчет трансформации ветровых волн и длинных волн (приливные волны и цунами) в прибрежной зоне с эффективным расчетом зон наката, включая процессы формирования многосвязных затопленных областей при откатах волны.
- Расчет полей прибрежных течений при совместном влиянии ветра, градиентных течений глубоководной зоны, приливов и ветровых волн с учетом механизмов расчета формирования волновых радиационных напряжений.
- Расчет штормовых нагонов.
- Расчет переноса взвешенных и влекомых наносов в прибрежной зоне под влиянием волн и течений, заносимости морских навигационных каналов.
- Расчет переформирования морских берегов и дна в прибрежной зоне под влиянием природной сезонной и многолетней изменчивости полей волн и течений, а также под влиянием гидротехнических сооружений ограждающих молов, берегозащитных сооружений в различной компоновке, портовых сооружений.

Дополнительные модули системы COASTOX применимы для решения следующих прикладных задач:

- Перенос различных загрязняющих веществ, в том числе радионуклидов, в реках и прибрежной зоне моря в растворе и на взвесях, а также их накопление в донных отложениях.
- Распространение корабельных волн в прибрежной зоне, генерируемых крупнотоннажными судами (сухогрузы, танкеры, быстроходные паромы) и быстроходными небольшими катерами в узостях, проливах и прибрежной зоне моря, расчет нагрузок от таких волн на береговых сооружения и пришвартованные суда, накат таких волн на берег.
- Лагранжевый перенос наносов от района сбросов грунта – морских свалок.
- Двумерное растекание пленок нефти при нефтяных разливах.
- Взаимодействие волн и подповерхностых вод (в зоне аэрации и грунтовых вод) в прибрежной зоне.
- Загрязнение подповерхностных вод в прибрежной зоне интрузии соленых вод.

Для расчетов структуры трехмерных течений для ситуаций, когда становятся важны процессы температурной и плотностной стратификации (водоемы охладители, эстуарии, шельфовые морские течения) в УЦЭВП создана программная система ТРИТОКС наряду с гидротермодинамическим модулем, включающая также модули переноса наносов (в Эйлеровой и Лагранжевой реализациях), радионуклидов, параметров качества воды (БПК, РК, соединения азота фосфора и других), модуль трехмерного расчета переноса нефти при нефтяных разливах.

Программная система, написанная на языке FORTRAN, имеет модульную структуру. Под управляющим модулем функционируют подпрограммы, реализующие следующие модели.

Модели трансформации волн в прибрежной зоне

Модуль постпроцессинга результатов расчетов в модели SWAN. Спектральная модель Технического университета Дельфт (Дания) SWAN, распространяемая в открытых кодах, в последнее десятилетие стала общепринятым в мировой практике береговой инженерии инструментом для расчета трансформации ветровых волн из зон глубоководья в прибрежную зону. COASTOX-M-12 включает модуль пост процессинга последних версий модели, также реализованных на неструктурированных сетках, для передачи результатов SWAN в другие модули системы и может быть снабжен кодом SWAN, третированным для использования в COASTOX-M-12.

Модель HWAVE. Модель позволяет проводить расчеты волнового режима прибрежной зоны или огражденной морской акватории на

основе численного уравнений пологих уклонов (mild slope equations) в гиперболическом приближении. Преимуществом модели перед SWAN является более точное описание эффектов отражения волн, рефракции и дифракции на неоднородностях донного рельефа и оголовках молов и других гидротехнических сооружений, поэтому ее применение рекомендовано в прибрежной зоне с инженерными сооружениями.

Модель HWAVE-S. Модель HWAVE-S является спектральной версией монохроматической модели HWAVE.

Модель усредненных по глубине течений и поля возвышения свободной поверхности длинных волн *COASTOX-CUR* – модель расчета полей прибрежных течений, генерируемых при совместном влиянии ветра, градиентных течений глубоководной зоны, приливов и ветровых волн. Численный модуль методом конечных объемов на неструктурированных сетках решает двумерные уравнения мелкой воды, включающие члены, описывающие эффекты донного трения, волновых радиационных напряжений, горизонтального турбулентного перемешивания. В силу универсальной структуры уравнений они могут, кроме прибрежных течений, при соответствующих граничных условиях и отключенном модуле волновых радиационных напряжений, описывать разнообразные длинноволновые процессы – течения в реках, трансформацию приливных волн, штормовые нагоны, волны цунами. Реализованы алгоритмы параллелизации расчетов на многопроцессорных и/или многоядерных системах.

Модель транспорта наносов

Модель COASTOX-SED основана на численном решении методом конечных объемов уравнений адвективно-диффузионного переноса наносов. Локальная интенсивность процессов осаждения и эрозии дна принимается пропорциональной разности мгновенной и равновесной концентрации наносов в каждом расчетном узле. Для расчета последней используется библиотека известных формул современной теории транспорта прибрежных наносов.

Модель расчета переформирования дна и берегов

Модель *COASTOX-MORPHO* основана на двумерном уравнении баланса массы донного материала в прибрежной зоне (уравнении Экснера), численно реализуемой на той же расчетной сетке, что и модели COASTOX-CUR и COASTOX-SED. Тестирование модели проводилось по данным ставших стандартными лабораторных тестов для моделей размыва прибрежной зоны (например, динамика формирования «ножки» - «томболо» между берегом и построенным параллельно берегу волноломом) и по данным долговременной динамики берегов с привлечением анализа спутниковых снимков.

Общая схема взаимодействия отдельных модулей программной системы представлена на рис. 4.

В последние годы в мировой практике морской гидротехники широкое распространение получили комплексы математических численных моделей, позволяющих рассчитывать эффективность сооружений в условиях высокой неоднородности гидродинамических и морфодинамических процессов. Наиболее распространенными для решения таких задач являются программные пакеты реализации двумерных и трехмерных математических моделей:

- MIKE-21 и, MIKE- 3, разработанные в «DHI Water&Environment», Дания;
- Delft-3D, разработанная в фирме Deltares, Нидерланды;
- SMS, объединяющий модели ряда американских университетов.

К преимуществам COASTOX-MORPHO перед перечисленными выше коммерческими пакетами при близкой структуре уравнений используемых моделей следует отнести устойчивые алгоритмы численного моделирования на неструктурированных сетках. Также достоинством COASTOX является распараллеливание вычислительных алгоритмов, что позволяет резко ускорить расчеты, проводя их как на высокопроизводительных многопроцессорных кластерных системах, так и на многопроцессорных/многоядерных персональных компьютерах.

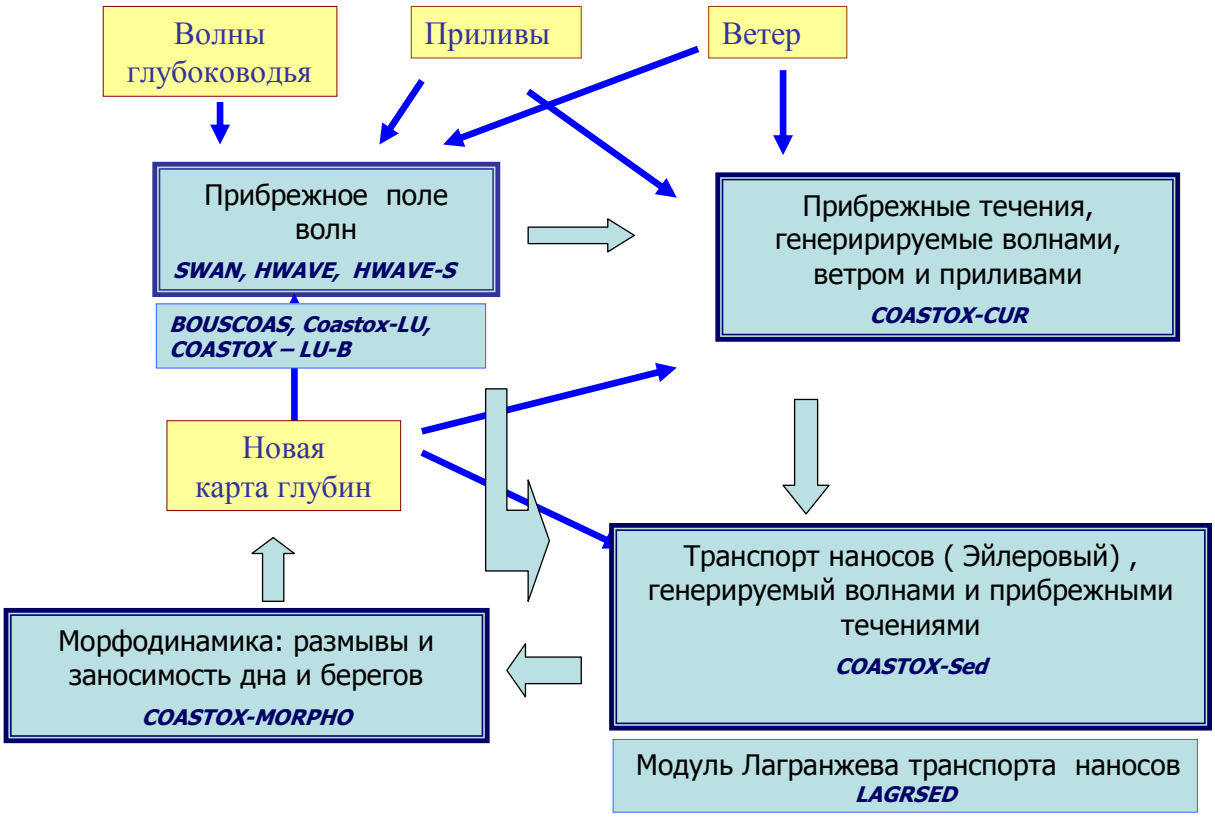


Рис.4. Схема взаимодействия программных модулей
системы COASTOX-MORHO-12

Примеры исследований портовых сооружений

Комплексный подход к исследованию волновых и ледовых воздействий применялся в МГСУ в последние годы для поддержки проектирования ряда портовых проектов. В каждом из этих исследований выявлялись и анализировались новые методические и научные вопросы, некоторые коротко представлены ниже. Более подробно результаты исследований освещены в [12-15].

Здесь представлены некоторые результаты выполненных исследований проектируемого сухогрузного района морского порта Тамань. В рамках проведенных исследований проводилось численное и физическое моделирование, рассматривались вопросы определения волн и волновых воздействий на сооружения порта, резонансные характеристики проектируемой портовой акватории.

Строительство нового сухогрузного района морского порта Тамань предусматривается в районе мыса Тузла, Таманский полуостров, Краснодарский край. Проектная мощность проектируемого порта 93,8 млн тонн в год. Порт глубоководный, предназначен для перевалки широкой номенклатуры сухих грузов: уголь, зерно, минеральные удобрения, сера, металлы. Схема сухогрузного района морского порта Тамань согласно Генеральному плану показана на рис.5. Предусмотрено 30 причалов с общей длиной причального фронта 8117,30 м.

Базовые расчетные модули системы показаны в двойных рамках. Широкие стрелки между ними – потоки рассчитанных результатов между модулями. Узкие стрелки – поступление внешних для системы данных используемых в качестве генерирующих членов-источников в уравнениях моделей (ветер), граничных условий (волны глубоково-

дья, приливы) и начальных условий (глубины, периодически обновляющиеся по результатам морфодинамических расчетов). Голубые блоки в тонких рамках – дополнительные модели, не входящие в базовую конфигурацию, которые могут подключаться для решения специализированных задач.

В настоящее время разработанная проектная документация успешно прошла государственные экспертизы.

Для расчетов характеристик волн в Керченском проливе используется модель SWAN, ветровые поля для расчета которой основываются на данных реанализа NCEP/NCAR полей ветра в период с 1989 по 2012 годы с привлечением для корректировок данных, уточненных по спутниковым наблюдениям и измерениям волн в регионе.

Использование модели SWAN позволяет выполнить расчеты волн для места установки волноизмерительного буя в районе Геленджика, с помощью сравнения установлен верификационный коэффициент для расчетов высот волн.

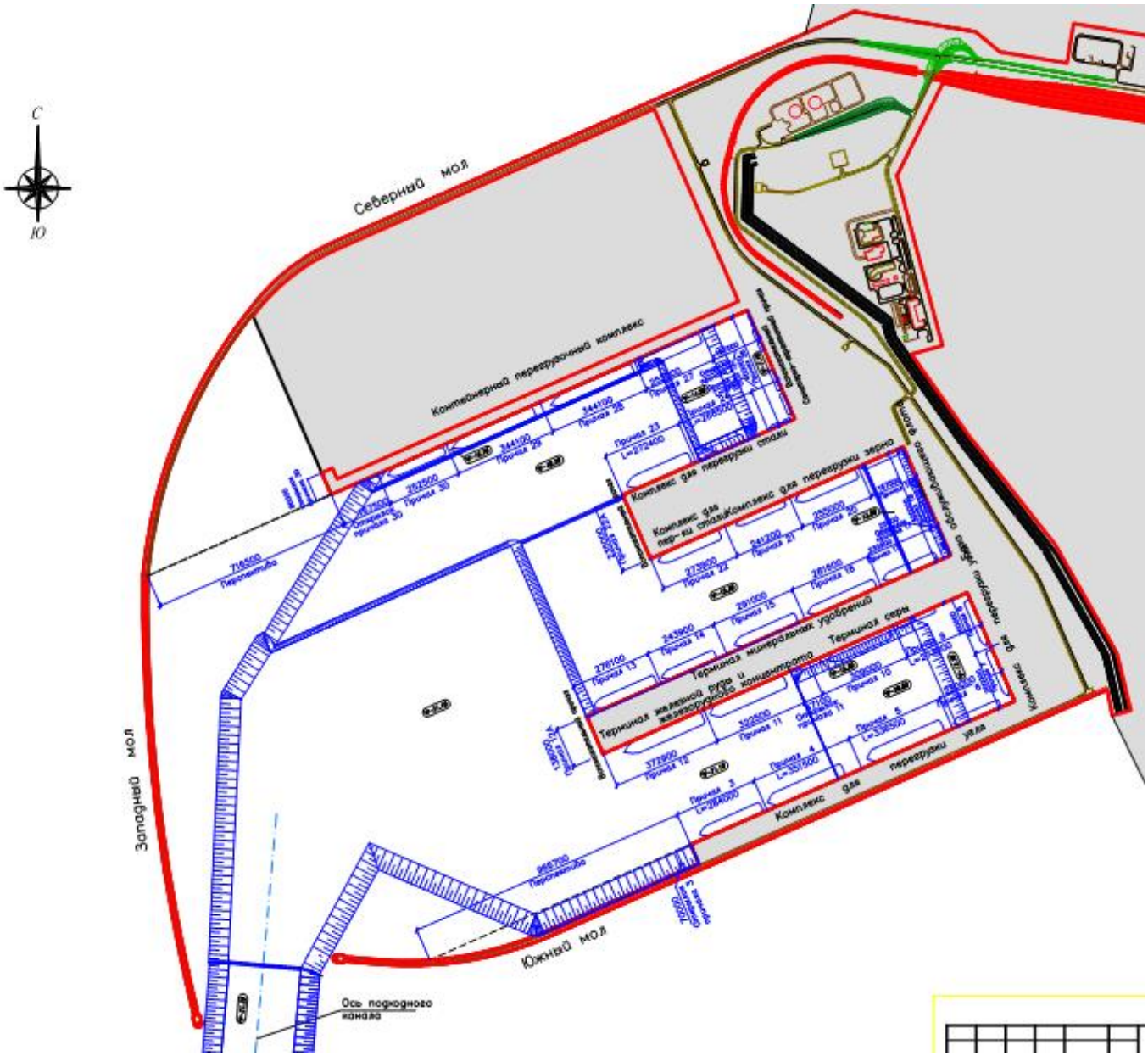


Рис.5. Схема расположения оградительных и причальных сооружений проектируемого порта Тамань

Расчеты полей ветровых волн проводились на трех вложенных прямоугольных сетках. Первая сетка полностью покрывает акваторию Черного и Азовского морей, количество узлов сетки – 575×257, размер ячейки сетки – 1,5 мин или приблизительно 2,25 км. Вторая сетка, с десятикратным сгущением по отношению к первой сетке, покрывает район Керченского пролива с примыкающими акваториями Черного и Азовского морей. Размер второй сетки – 243 на 224 точек, размер ячейки – 0,15 мин. или 225 м. Третья сетка (рис. 6) покрывает акваторию проектируемого порта Тамань и примыкающую к нему часть Керченского пролива. Размер третьей сетки 342 на 373 точек, размер ячейки 0,015мин или 22,5 м.

На рис.6 видно, что проектом предусмотрено строительство подходного канала длиной 10,4 км и глубиной до 21,6 м со значительным объемом дноуглубительных работ.

В связи с уникальным характером проекта исследовательские работы по определению волновых воздействий и нагрузок для этого проекта выполнялись тремя организациями, вначале голландской фирмой Witteveen+Bos**,** затем филиалом ОАО «26 ЦНИИ» и на заключительном этапе, непосредственно перед и на этапе прохождения Главгосэкспертизы МГСУ. Это обстоятельство потребовало дополнительно анализировать результаты предыдущих работ и сравнивать их результаты с результатами МГСУ.

На первом этапе работ для выбора дат самых сильных штормов были просчитаны поля волн для всего Черного и Азовского моря на грубой сетке №1 за период 1989-2012 гг. По ряду высот волн были отобраны 5 самых сильных штормов, и для них далее проводились расчеты на двух более детальных вложенных сетках. Поле волн для шторма 11.11.2007 г., во время которого в районе Керченского пролива высоты волн максимальные, для части Керченского пролива возле порта Тамань (3-я сетка) с детализацией для акватории порта показаны на рис.7.

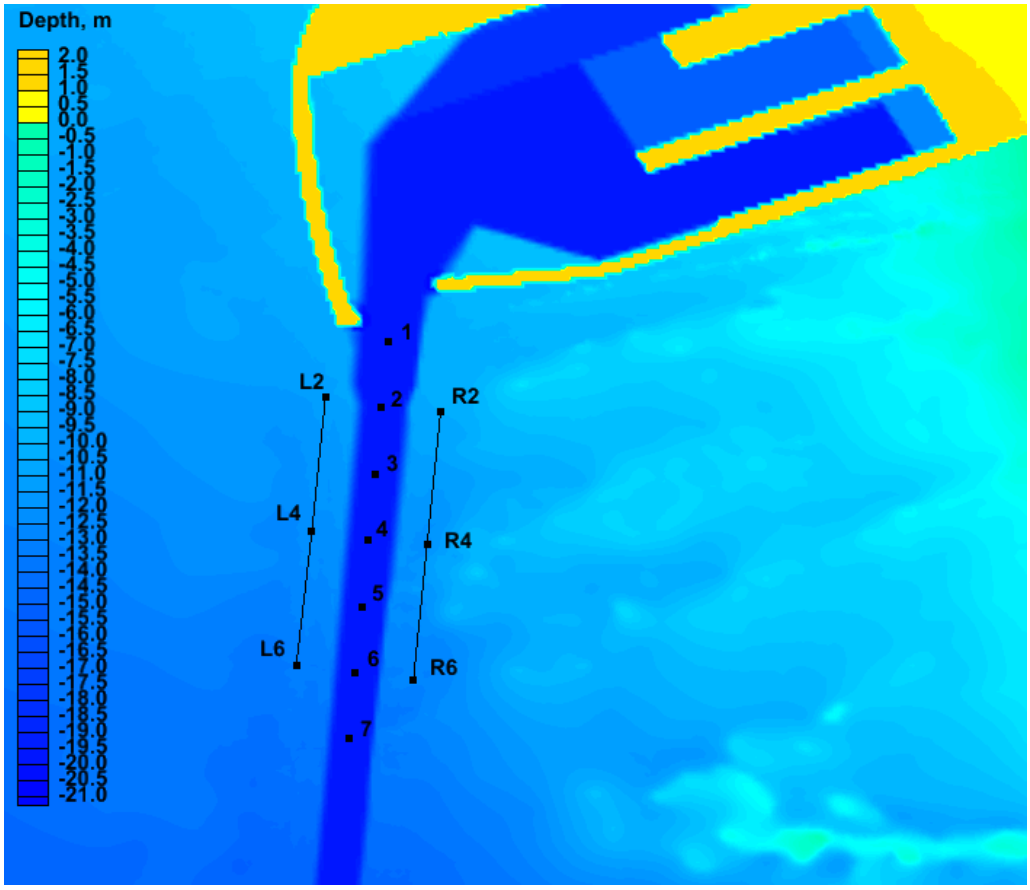


Рис.6. Область численного моделирования района порта и подходного канала. Показаны точки выдачи результатов моделирования

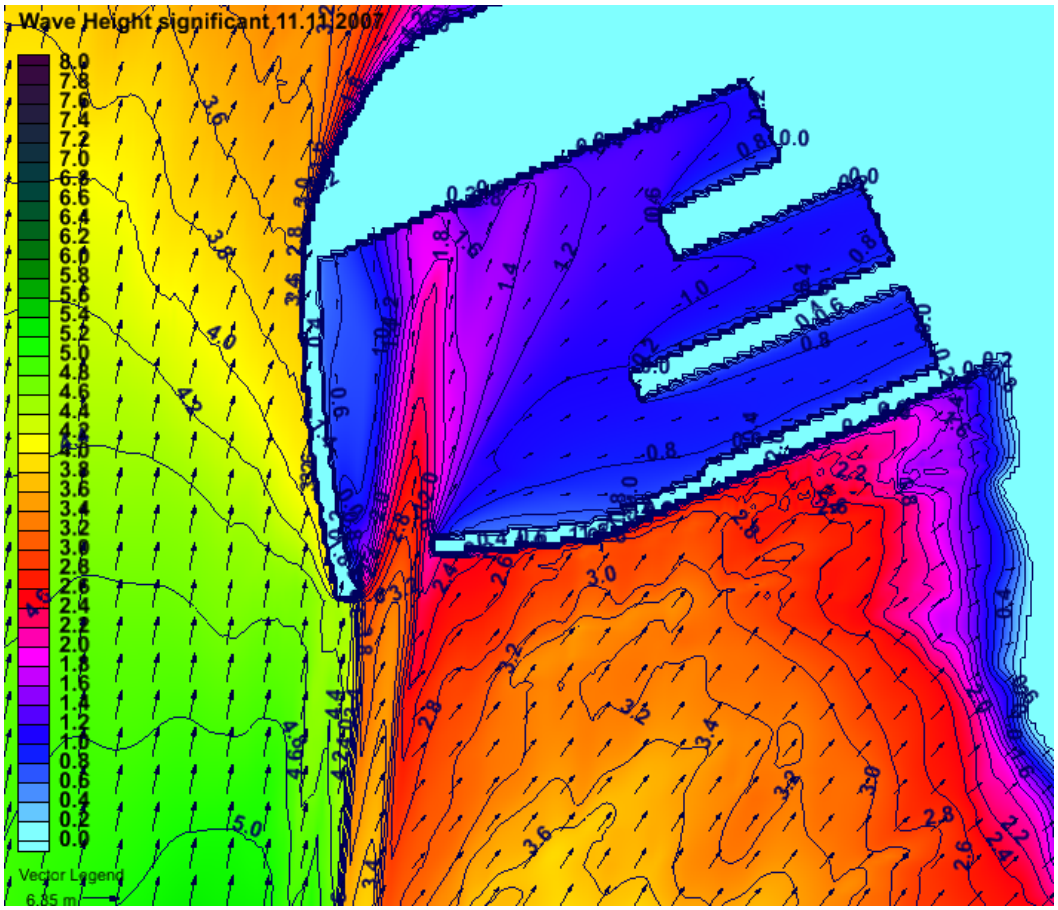


Рис.7. Поле ветровых волн в период шторма 11 ноября 2007 г. на подходе к порту Тамань

По результатам расчетов волновых полей полученных штормов определялись волновые характеристики в контрольных точках №1-7, расположенных на оси подходного глубоководного канала к порту Тамань, а также трех точек справа R1, R2, R3 и трех слева L1, L2, L3 от канала (см. рис.6). В этих точках фиксировались рассчитанные моделью SWAN максимальные значения значительных (13%) высот волн и соответствующих им периодов, и на их основании по формулам Глуховского были рассчитаны высоты и периоды волн 0,1%, 1%, 5%, 50% обеспеченностей.

Волны экстремальных штормов, как показали расчеты, подходят к порту Тамань с Южного и Юго-Юго-Западного направлений. Высоты 1% волн для сильных штормов в районе Западного мола могут достигать 6 м и значения периода до 14,3 сек. Внутри подходного канала 1% волны имеют высоту от 4,62-5,8 м и период 13,5-13,6 сек. На подходах к южному портовому молу 1% волны имеют высоту до 3,9 м и период 13,4 сек.

Как следует из рассчитанных волновых полей, в районе порта глубоководный канал играет роль своеобразного волногасителя в соответствии с общими принципами теории дифракции. Например, в точке L6 в шторме 11.11.2007 значительные ЮЮЗ волны имеют высоту 5,1 м, затем в канале их высота падает до 3,95 м и, пройдя над каналом, волна теряет еще 0,4 м своей высоты. Для того же шторма вблизи волнозащитных молов, левее канала в т. L2 – высота 13% волн – 4,47 м, над каналом в т.2 – 3,30 м, и правее канала в т.R2 – 2,79 м.

Далее, для расчета характеристик максимальных волн в Керченском проливе в районе порта Тамань были рассчитаны волновые поля в проливе для 30 максимальных годовых штормов за период 1983-2012 гг. Пример результатов показан на рис.8.

На следующем этапе работ выполнялся расчет режима волнения в окрестности и внутри гавани морского порта Тамань. В соответствии с заданием проектировщиков рассматривались два варианта конфигурации

порта с разными конструкциями причалов №23 и №30. В обоих случаях причалы запроектированы в виде свайных ростверков, в конфигурации 2 причалы имеют подпричальные откосы и волногасящие камеры для снижения отражения волн во внутреннюю акваторию порта. Расчеты волновых полей внутри порта проводились моделью открытого доступа ARTEMIS, позволяющей эффективно учитывать изменения волноотражающих свойств причалов.

Изменение конструкции причалов учитывалось изменением коэффициента отражения в модели вдоль соответствующих причалов.

Расчетная сетка на акватории порта состоит из 121209 узлов, 238679 треугольных элементов. Расстояние между узлами меняется в диапазоне 5-9 м: 9 м в подходном канале и самом глубоком участке дноуглубления, 5 м около границ области.

Полученные распределения высот волн вдоль причального фронта для одного из расчетных сценариев показано на рис.9. Применение волногасящих конструкций причалов 23 и 30 существенно снижает высоты волн у всех причалов.

Одновременно с численным моделированием проводилось физическое моделирование сооружений порта в волновом бассейне и в волновом лотке. Для физического моделирования был выбран участок акватории проектируемого порта, включающий зону расположения голов, молов и подходной канал. Масштаб физической модели в волновом бассейне был выбран 1:52.

Параметры волн 1% обеспеченности, набегающие на головы молов с направления 190 гр., в натурных условиях при глубине воды d = 11,8 м, следующие: высота h = 4,7 м, период T = 14,45 сек. Соответствующие характеристики волн определялись по результатам численного моделирования и пересчитывались в соответствии с масштабом моделирования.

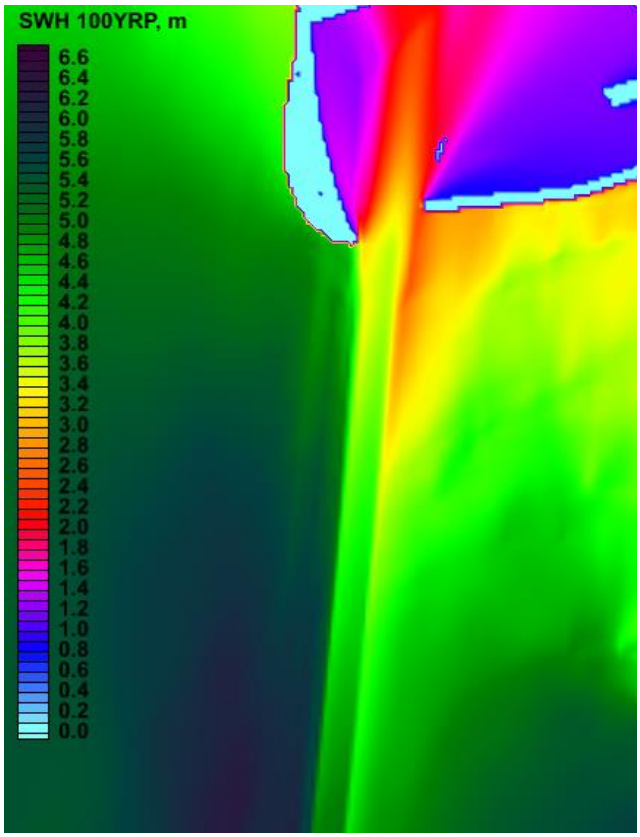


Рис.8. Поле высот значительных волн повторяемостью 1 раз в 100 лет

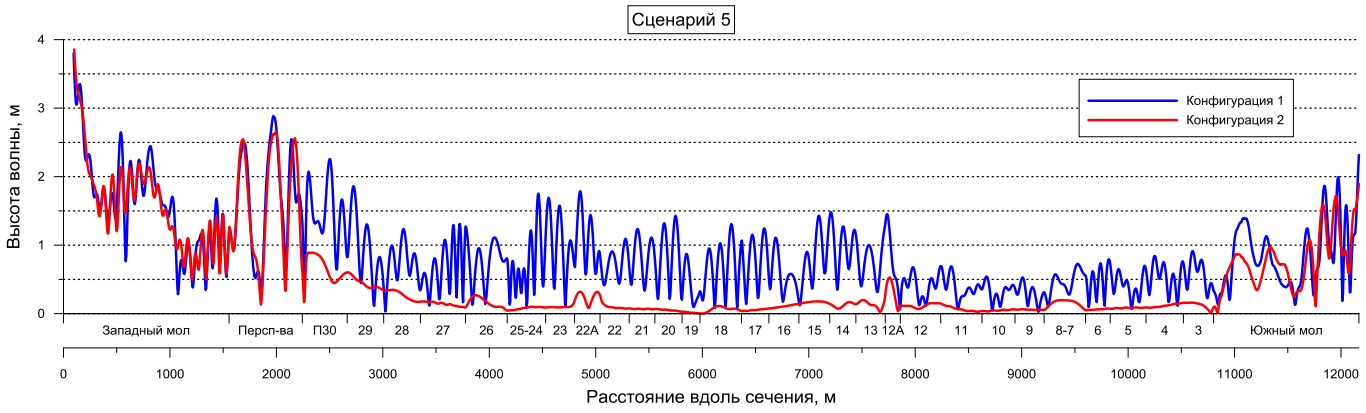


Рис.9. Высота волны вдоль причального фронта порта для сценария 2 (волны 1% обеспеченности повторяемостью 1 раз в 100 лет)

Расположение моделей голов Южного и Западного мола в бассейне показано на рис.10. На модели воспроизводилось многослойное откосное набросное прикрытие голов молов, верхний слой откоса защищен тетраподами массой в натуре 13 тонн.

По результатам физического моделирования установлено, что устойчивость элементов крепления голов к воздействию расчетной волны не обеспечивается – наблюдалось множественное смещение тетраподов, располагающихся в зоне переменного уровня воды, вымывание подстилающего слоя сортированного камня – рис.11. Подбор массы тетраподов, устойчивых к расчетному волнению, было рекомендовано провести на основании двумерного моделирования в волновом лотке лаборатории.

С помощью специальной серии опытов в волновом лотке было установлено, что массу тетраподов откосного крепления голов молов необходимо увеличить до 20 тонн, что обеспечивает устойчивость защитного крепления.

Эксперименты в бассейне были повторены с усиленным креплением, результаты получены удовлетворительные. Вид модели голов молов после новой серии экспериментов в волновом бассейне показан на рис.12.

Было выполнено численное моделирование поля волн для условий проведенных экспериментов в волновом бассейне. Результаты сравнивались с измерениями волн в бассейне, сходимость результатов измерений и расчетов удовлетворительная.

Вывод

Исследования портовых гидротехнических сооружений необходимо проводить с использованием натурных измерений волнения, расчетов, численного и физического моделирования. Такой подход обеспечивает выполнение исследований на современном научном уровне, что, в свою очередь, позволяет получить безопасные проектные решения. Кроме того, такой подход соответствует требованиям актуальных нормативных документов.

Рис.10. Модели голов молов порта в волновом бассейне без воды

Рис.11. Характер волнового разрушения модели головы Южного мола

Рис.12. Модель головы Западного мола с усиленной откосной защитой в волновом бассейне после окончания опытов

Библиографический список

1. Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. / Б.В. Дивинский, Р.Д. Косьян, И.С. Подымов, О.В. Пушкарев // Океанология. 2004. т. 43. №6.
2. Давление на дно, вызванное прохождением уединенной волны в прибрежной зоне / К.И. Кузнецов, А.И. Зайцев, Е.Н. Пелиновский, А.А. Куркин // Экологические системы и приборы. 2013. № 9.
3. Кантаржи И.Г., Кузнецов К.И. Натурные измерения волнения при определении нагрузок на морские гидротехнические сооружения // Инженерно-строительный журнал. 2014. №4(48).
4. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов). – Л.: ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева, 1977.
5. Кантаржи И.Г., Шунько Н.В. Моделирование ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения: Сборник научных трудов IV Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России» - Рыбинск Ярославской области, 24-29 июня 2013 г. – М.: ИВП.
6. Margvelashvili N., Maderich V., and Zheleznyak M. (1997). THREETOX - a computer code to simulate three-dimensional dispersion of radionuclides in stratified water bodies. Radiation Protection Dosimetry, 73, Nos 1-4.
7. Maderich V., Heling R., Bezhenar R., Brovchenko I., Jenner H., Koshebutskyy A., Kuschan A., Terletska K. (2008). Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters. Hydrological Processes, DOI: 10.1002/hyp.6985.
8. Численное моделирование льда для целей гидротехнического строительства в условиях ледовой нагрузки: Материалы конференции «Инновационные материалы и технологии для строительства в экстремальных климатических условиях», Архангельск 2-4 декабря 2014 г. / И. Кантаржи, В. Мадерич, В. Кошебуцкий, Л. Козий. – Архангельск: САФУ, 2014.
9. I. Kantarzhi, N. Zuev, N. Shunko, M. Zheleznyak, P. Dikiy, M. Sorokin. Numerical and physical modelling of the waves inside the new marina in Gelendjik (Black Sea). Применение физического моделирования для защиты портов и берегов, Труды 5 международной конференции, Варна, Болгария, 29 сентября – 2 октября 2014, Изд-во Болгарской береговой ассоциации.
10. Численная модель волн, течений и переформирования берегов прибрежной зоны моря: Сборник трудов конференции «Моделирование – 2006» / Р.И. Демченко, М.И. Железняк, С.Л. Кивва, П.С. Коломиец. – Киев.
11. Кивва С.Л., Железняк М.И. Двумерное моделирование стока и транспорта наносов с малых водосборов // Прикладная Гидромеханика. 2002. №4(76). Вып.1.
12. Моделирование волнового режима побережья Имеретинской низменности / П.В. Дикий, Н.Н. Дзюба, М.И. Железняк, М.В. Сорокин // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. №7(2).
13. Математическое моделирование береговых процессов Имеретинской низменности для обоснования берегозащитных мероприятий / М.И. Железняк, И.Г. Кантаржи, И.О. Леонтьев, В.М. Шахин // Гидротехническое строительство. 2011. №10.
14. Кантаржи И.Г. Физическое и численное моделирование волн у портовых гидротехнических сооружений. Береговая зона – взгляд в будущее: Материалы XXV международной береговой конференции, 13-17 октября 2014. – Сочи: Изд-во ГЕОС. Т.2.
15. Кантаржи И.Г. Уточнение расчетных элементов волн и льда для определения нагрузок на морские гидротехнические сооружения на основе натурных наблюдений // Гидротехническое строительство. 2014. №1.

Читайте подробнее о нас | www.велд.рф
www.weld.su

weld@weld.su | Напишите нам письмо

ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОРТА ПЕВЕК

УДК 551.46.09, 551.466.4

Левачев Станислав Николаевич
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», кандидат технических наук, профессор

Кантаржи Игорь Григорьевич
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», доктор технических наук, профессор

АННОТАЦИЯ

Проект ПАТЭС для города Певек Чукотского автономного округа РФ разрабатывается для обеспечения работы плавучей атомной станции малой мощности, размещенной на гладкопалубном несамоходном ледокольного типа судне с двумя реакторными установками КЛТ-40С. Длина судна – 144 м, ширина – 30 м. Водоизмещение – 21,5 тыс т. В качестве вариантов гидротехнических сооружений для плавучей АЭС рассмотрены три принципиально разных компоновочных и конструктивных решения для защиты ПАТЭС от внешних волновых и ледовых воздействий. Первый вариант представляет собой мол – причал в акватории, второй – причал, устраиваемый в искусственно вырытом ковше акватории, третий – док с откатным затвором. Выполнено математическое моделирование основных факторов внешней нагрузки на проектируемые гидротехнические сооружения в районе потенциального размещения ГС-станции: полей ветровых волн в акватории в безледный период; полей течений в акватории в безледный период; литодинамических процессов в районе размещения станции для обоснования возможных дноуглубительных работ, размывов и аккумуляции наносов; ледовых полей в акватории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Плавучая атомная станция, Порт, Варианты компоновки, Гидротехнические сооружения, Волновые воздействия, Ледовые воздействия, Численное моделирование

Введение

Более 60% территорий северных и дальневосточных регионов России не входит в систему централизованного энергоснабжения. Энергетическая безопасность и условия для устойчивого социально-экономического развития отдаленных российских регионов могут быть обеспечены путем широкого применения энергетических установок малой (единицы и десятки МВт) мощности, в частности плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС). Проект установки ПАТЭС для города Певек Чукотского автономного округа Российской Федерации разрабатывается на основании постановления Правительства Российской Федерации от 20.09.2008 г. №705 о Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» на долгосрочный период (2009-2015 годы).

Мобильная атомная энергетика

Основным элементом плавучей атомной станции (рис.1) является плавучий энергетический блок (ПЭБ), прототипом которого являются ледокольные суда с атомными энергетическими установками.

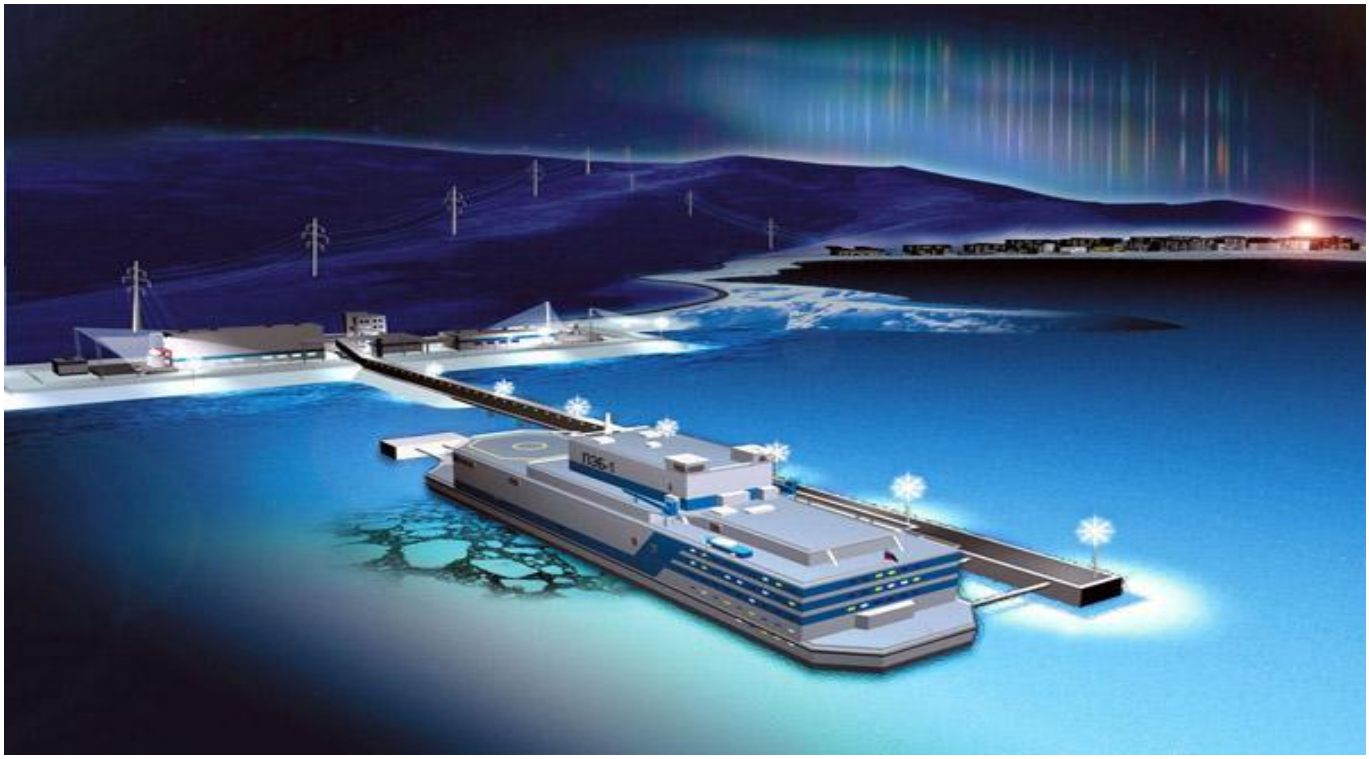


Рис.1. Общий вид установленной ПАТЭС

Создание плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС) на базе плавучего энергоблока для обеспечения потребителей электрической и тепловой энергией является новым направлением в развитии атомной энергетики в России. Оно находится на стыке двух отраслей – судостроения и стационарной атомной энергетики. Подобные атомные станции имеют свои особенности и свою специфику.

В настоящее время завершается строительство первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» на основе судовой реакторной установки КЛТ-40С водо-водяного типа (головной разработчик ОАО «ОКБМ Африкантов»). Установленная электрическая мощность двух РУ составляет 70 МВт, тепловая мощность – до 300 ГКал/час; реакторы могут также использоваться в системе опреснения морской воды (рис.2).

Согласно проекту, плавучая атомная станция малой мощности состоит из гладкопалубного несамоходного судна с двумя реакторными установками КЛТ-40С ледокольного типа. Длина судна – 144 м, ширина – 30 м. Водоизмещение – 21,5 тыс. т. Установленная электрическая мощность каждого реактора – 35 МВт, тепловая мощность – 140 Гкал/час. Срок эксплуатации станции составит минимум 36 лет: три цикла по 12 лет, между которыми необходимо осуществлять перегрузку активных зон реакторных установок. Принципиальная схема установки ПАТЭС представлена на рис. 3.

Для благополучного отстоя судна вблизи населенных пунктов необходимо возвести порт, обустроенный рядом береговых и гидротехнических сооружений.

Рис.2 ПАТЭС «Академик Ломоносов»

Рис. 3. Принципиальная схема установки ПАТЭС

Условия строительства

Установка ПАТЭС планируется в Чукотском автономном округе, в городе Певек, расположенном на восточном берегу одноимённого пролива, соединяющего Чаунскую губу и Восточно-Сибирское море. Для Чукотки строительство плавучей атомной станции важно в связи с необходимостью замены неоднократно выработавшей свой ресурс Чаунской ТЭЦ, расположенной в Певеке. Сооружение ПАТЭС предусматривается Стратегией развития Чукотского автономного округа на период до 2020 года. Этот объект станет основой энергетической инфраструктуры Чаун-Билибинского промышленного узла, обладающего значительными запасами золота, серебра, меди и других цветных металлов.

На установку ПАТЭС «Академик Ломоносов» предполагается затратить 16,5 млрд руб., из которых стоимость самого энергоблока составляет 14,1 млрд руб., ещё около 2 млрд – средства на возведение береговых и гидротехнических сооружений.

По результатам изысканий, проведённых в районе предполагаемого строительства, климат района следует отнести к суровому. Толщина расчётного льда составляет 2 метра, а максимальная площадь ледяного поля достигает 1 км^2. Расчётная высота волны 0,1% обеспеченности достигает 4,5 м. Для уточнения ледовых и волновых воздействий на сооружения в районе строительства были проведены модельные исследования, результаты которых приведены ниже.

Дно акватории слагается гравийным грунтом с супесчаным заполнителем, суглинками тяжёлыми и лёгкими с включением гальки и щебня, песчанистой супесью, дресвяным грунтом и скальной породой (алевролитом) прочным и среднепрочным.

Геологические условия в береговой части характеризуются прежде всего наличием вечной мерзлоты, с глубиной сезонного оттаивания до 3 м. Основание сложено помимо техногенного слоя на поверхности, галечниковым и гравийно-галечниковым грунтом, суглинком, суглинком с включением щебня, щебенистым грунтом и скальной породой (алевролитом). Также в некоторых скважинах встречаются линзы ледогрунта.

Варианты компоновки

В качестве вариантов гидротехнических сооружений для плавучей АЭС рассмотрены три принципиально разных компоновочных и конструктивных решения для защиты ПАТЭС

от внешних волновых и ледовых воздействий. Первый вариант представляет собой мол – причал в акватории (рис.4). Второй – причал, устраиваемый в искусственно вырытом ковше акватории. Третий – док с откатным затвором.

Мол-причал Г-образной формы ячеистой конструкции прямоугольного профиля: 10×18 м выполняется из трубошпунта диаметром 1420 мм. Данный профиль был выбран исходя из удобства ведения строительно-монтажных работ. Рассмотрен также вариант ячеистой конструкции цилиндрического профиля диаметром 18 м, из того же трубошпунта. Протяжённость всего сооружения составляет 666 м вместе с корневой частью. Расположение мола обусловлено господствующим направлением ветра, а также соотношением объёма дноуглубительных работ к объёму обратной засыпки ячеек.

Трубошпунт погружается в среднем на 5 м в грунт основания, ячейка засыпается грунтом, образовавшимся при дноуглубительных работах (гравийный грунт). Внутренняя полость трубошпунта со стороны открытой акватории частично заполняется бетоном. В переменном уровне воды устраивается противоледовый пояс, представляющий собой железобетонную диафрагму, основная роль которой – восприятие ледовой нагрузки. Конструкция представлена на рис. 5.

На верхнем строении мола-причала устраивается волноотбойное устройство (парапет) высотой 5,75 м для защиты технологического оборудования ПЭБ (трубопроводной и кабельной эстакады), расположенного вдоль мола, от волны.

Плавучая АЭС устанавливается в котловане глубиной 11,7 м, закрепляется специально спроектированными штангами, которые в свою очередь крепятся к амортизаторам, установленным на молу (рис.6).

Сооружение мола-причала предполагается возводить пионерным способом, начиная с корневой части, с последующим возведением ячеек. В зимнее время возможно вести строительные работы со льда, однако при этом необходимо, чтобы лёд набрал необходимую прочность. Время возведения мола-причала варьирует от полутора до двух лет. Следует отметить, что для данных гидрологических и метеорологических условий отсутствуют аналоги строительства оградительных сооружений подобной конструкции.

Рис.4. План мола-причала

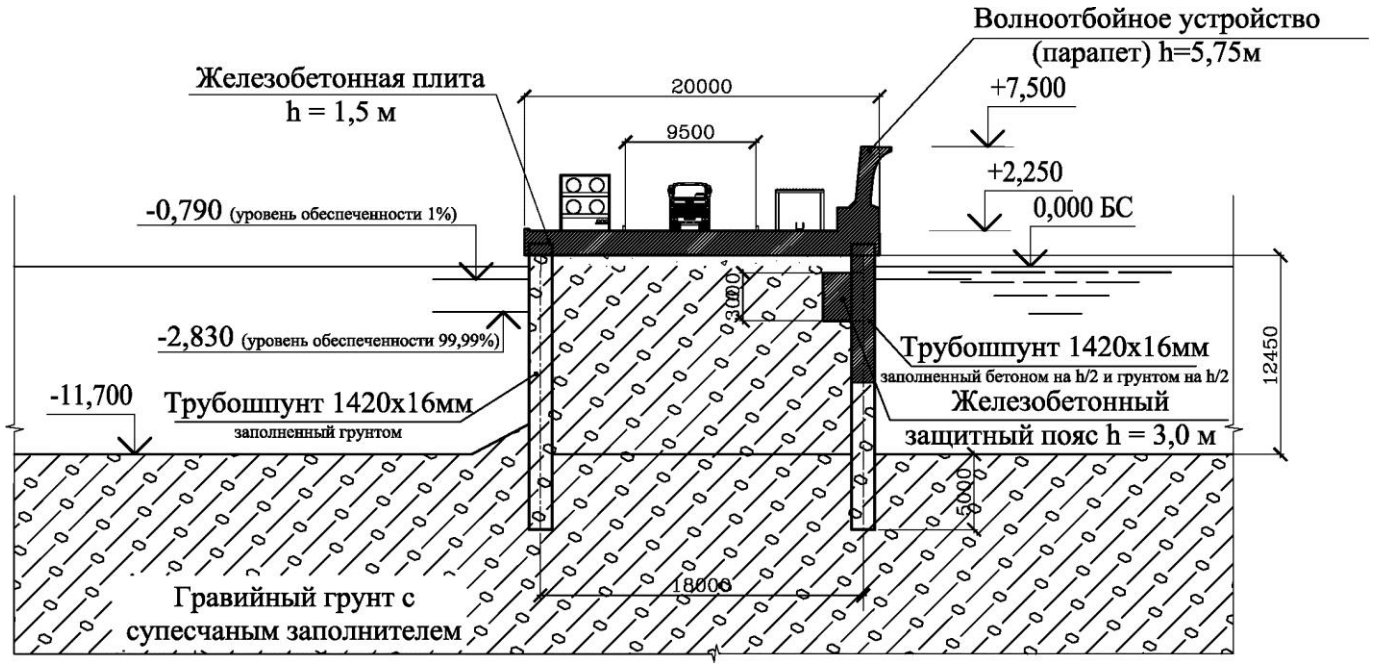


Рис.5. Конструкция мола

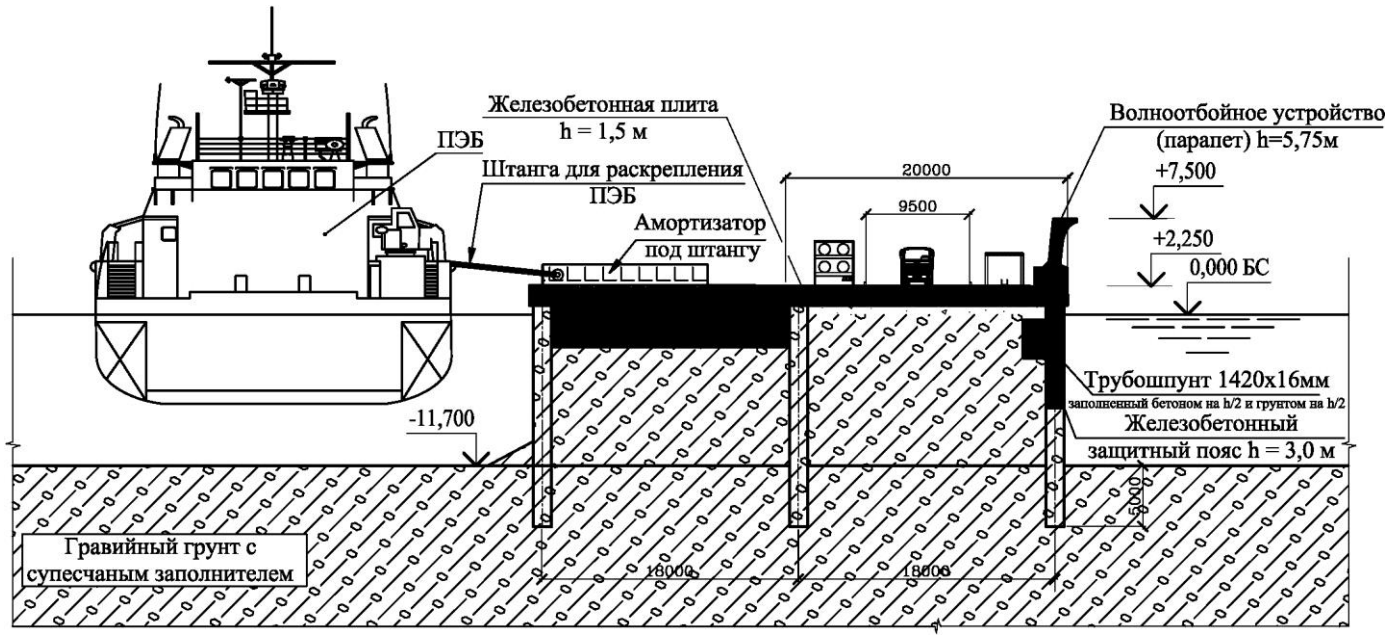


Рис.6. Конструкция причала для ПЭБ на молу

Основы расчета

Одним из расчётов ячеистой конструкции является расчёт устойчивости на сдвиг по вертикальной плоскости при действии ледовых нагрузок в период строительства. При этом боковое давление грунта внутренней засыпки, определяемое с учетом «силосного» эффекта, рассчитывается без учета равномерно распределенной нагрузки на уровне верха ячейки, повышающей силы трения по внутренней поверхности шпунта.

Принципиальная схема расчета приведена на рис.7.

В строительный период при воздействии на сооружение горизонтальных сил *Fr* от давления льда и E_{ah} от давления грунта, возникает перекос ячейки и в вертикальной плоскости сдвига развиваются силы трения T_1. Они действуют в средней плоскости и равны сумме сил:

$$T_1 = T'_1 + T''_1,$$

где T'_1 – сила трения в грунте, равная: $T'_1 = E_{cr} \cdot D \cdot tg\varphi_{d,up}$;

T''_1 – сила трения в замках шпунта, расположенных в средней плоскости, равная $T''_1 = E_{cr} \cdot D \cdot f$;

f – коэффициент трения в замках шпунта, принимаемый равным 0,4;

$\varphi_{d,up}$ – угол внутреннего трения материала засыпки;

E_{cr} – давление грунта, учитывающее трение по контакту, $E_{cr} = E_{ah} \cdot K_1$.

При перекосе ячейки возникают силы трения грунта о шпунт T_2, которые образуют пару с плечом $b=1{,}274\ R$. Значение T_2 определяется по формуле:

$$T_2 = E_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot tg\varphi_c;$$

где φ_c – угол трения грунта по металлическому шпунту.

Проектируя все силы на вертикальную ось, находим пару реактивных сил, противодействующих перекосу ячейки:

$$S = T_1 - T_2;$$

Плечо пары сил *S* будет равно $a=1{,}178\ R$.

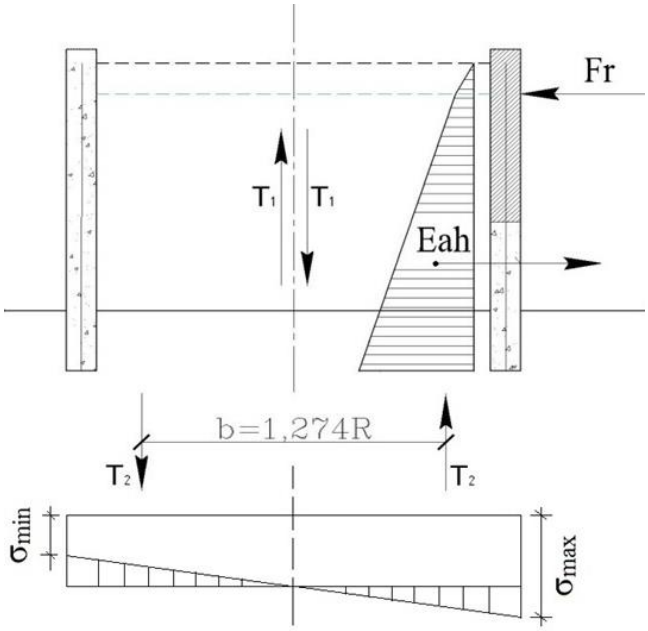


Рис.7. Расчетная схема ячейки в строительный период

Удерживающий момент определяется по формуле:

$$M_r = S \cdot a + T_2 \cdot b;$$

Устойчивость сооружения оценивается отношением:

$$\gamma_{lc} \cdot M_t \le \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot M_r;$$

где γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок, $\gamma_{lc} = 0{,}9$;

γ_c – коэффициент условий работы, $\gamma_c = 1{,}2$;

γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения (для сооружений I класса 1,25);

M_t – максимально возможный опрокидывающий момент (ледовая нагрузка от тороса), $M_t = Fr \cdot h$.

Для исключения перекосов ячеек в процессе эксплуатации увеличивается общая жесткость конструкции путем омоноличивания голов шпунта железобетонной плитой толщиной 1,5 м и железобетонным противоледовым поясом.

В этом случае устойчивость ячеистой конструкции на сдвиг рассчитывалась при действии ледовых нагрузок как гравитационного сооружения.

Второй вариант гидротехнических сооружений (рис. 8) представляет собой **причал ячеистой конструкции**, устраиваемый в искусственно вырытом ковше. Образовавшимся грунтом при дноуглубительных и земляных работах отсыпается искусственный остров, являющийся не только складом грунта, но и оградительным сооружением, защищающим акваторию ковша от внешних ледовых и волновых нагрузок. Ячейка диаметром 15,0 м устраивается из трубошпунта Ø1420 мм, который погружается до отметки –19 м.

По внутреннему полупериметру тыловой части причала погружается термошпунт, представляющий собой шпунт с приваренной к нему трубой диаметром 100 мм, по которой циркулирует керосин. Керосин – теплоёмкая горючая жидкость, плотность которой сильно варьирует в зависимости от температуры, что позволяет его в данном случае применять как терморегулятор (спускает холод на дно, поднимая тепло на поверхность). Насосных установок не требуется, так как происходит естественная конвекция. Длина причала составляет 277,5 м. На нём расположены также технологическое оборудование и устройства для раскрепления ПЭБ.

Геометрические характеристики искусственного острова обуславливаются, прежде всего, объёмом образовавшегося грунта вследствие дноуглубительных земляных работ. Длина по гребню составляет 249,0 м, ширина – 20 м, а средняя ширина по основанию – 70,0 м.

На откосе острова со стороны открытой акватории устраивается мощная железобетонная плита толщиной 2,0 м, основная роль которой является восприятие ледовой нагрузки. А на гребне устраивается монолитный волноотбойный парапет, с отметкой по верху +7,00 м. Разрез искусственного острова представлен на рис. 9.

Рис.8. Ковшевая компоновка гидротехнических сооружений

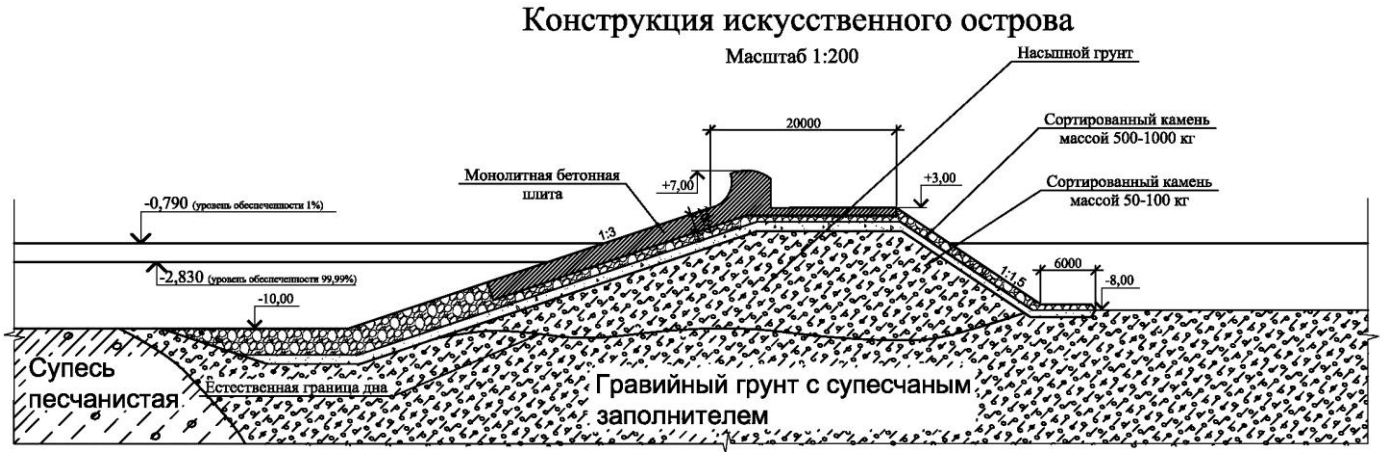


Рис. 9. Разрез искусственного острова

Береговая часть ковша разрабатывается сухоройной техникой по трёхъярусной схеме, с предварительной разрезкой вечной мерзлоты траншейными машинами. Отсыпка искусственного острова предполагается саморазгружающимися шаландами и автосамосвалами по установленному понтону ПМП-60.

Возможен вариант строительства вместо открытого ковша **железобетонного дока**, защищенного от внешних воздействий плоским откатным затвором (рис.10, 11).

При этой компоновке ПАТЭС защищается от всех внешних воздействий, в том числе от колебаний уровня воды.

Основные проблемы этого варианта компоновки заключаются в организации теплообмена при эксплуатации ПАТЭС, для чего она должна быть связана с акваторией специальными трубопроводами. В то же время защита вечной мерзлоты осуществляется с помощью термосвай, как и в ковшевом варианте.

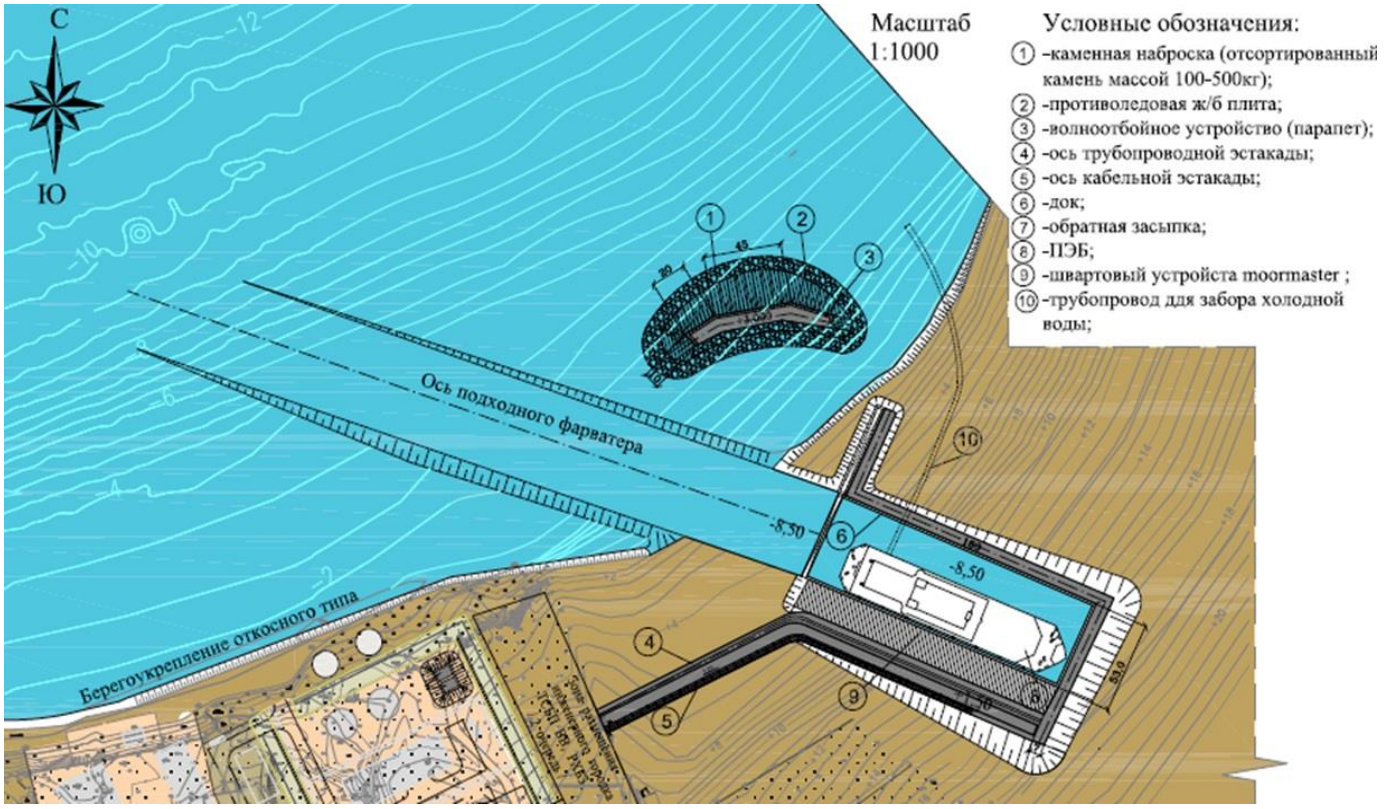


Рис.10. Схема установки ПАТЭС в доке

Разрез 1-1

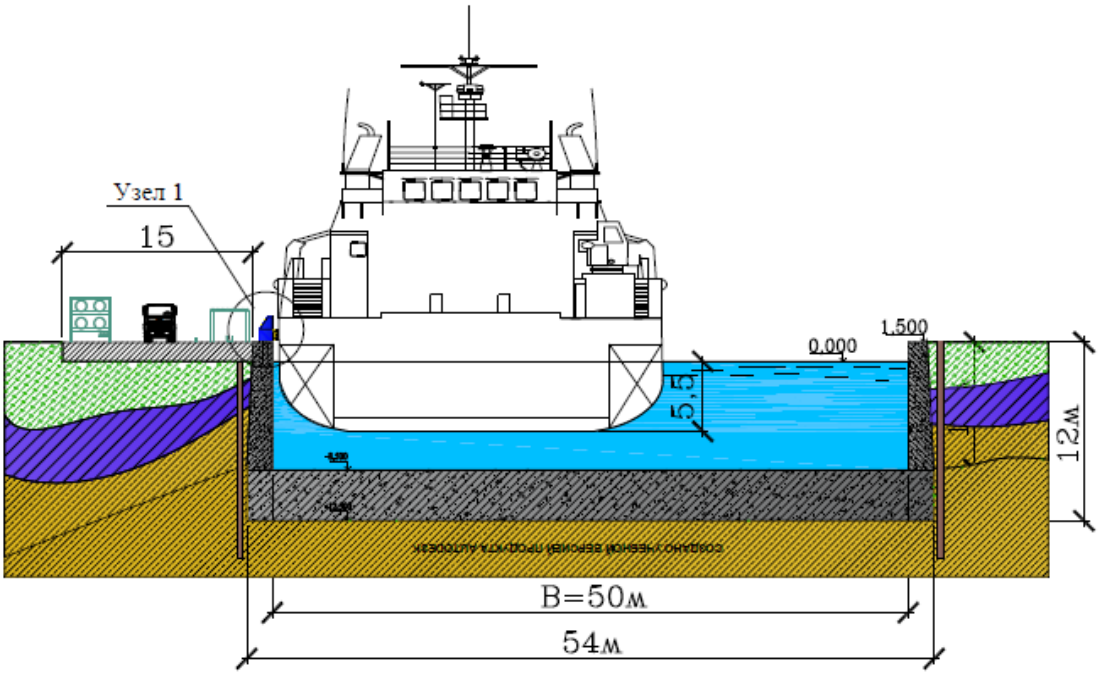


Рис.11 Поперечный разрез установки

Выбор оптимального варианта установки ПАЭС производится на основе технико-экономического сравнения представленных решений, учитывая сложную ледовую обстановку в акватории, наличие вечной мерзлоты на территории строительства ковша и дока и особенности теплообмена в акватории при работе ядерной установки.

Методика численного моделирования ледовых полей на подходе к порту

При определении ледовых нагрузок на сооружения чаще всего используются изыскания в районе проектирования, в том числе используются измеренные характеристики ледового покрова на небольшом количестве постов наблюдения. Новые возможности получения этих характеристик предоставляет математическое моделирование с использованием системы моделей, состоящих из трехмерных моделей циркуляции океана и гидротермодинамических моделей ледового покрова. Такие модели дают возможность оценить динамические характеристики ледового покрова с высоким пространственно-временным разрешением.

Использование математического моделирования льда соответствует требованиям Технического регламента о безопасности зданий и сооружений, СНиП 2.06.04-82* «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [1]. Согласно требованиям этих документов, при отсутствии необходимых исходных данных допускается использовать методы математического моделирования с применением апробированных программных комплексов [2].

Использование математического моделирования позволяет получить расчетные параметры ледовых полей за характерный период времени в регионе. Кроме того, только такой подход позволяет выполнить сравнение расчетных характеристик льда с результатами натурных измерений, что обеспечивает выполнение требований СНиП 2.06.04-82*.

Физическое моделирование льда в лабораторных условиях является сложной проблемой, натурные изыскания в районе предполагаемого строительства ограничены или отсутствуют. Поэтому математическое моделирование именно льда имеет особое значение. Определение характеристик льда для морского гидротехнического строительства состоит

из двух этапов: на подходе к сооружениям или без сооружений и собственно при взаимодействии с сооружениями.

В настоящей работе используется моделирующая система THREETOX. Данная система включает в себя модель циркуляции для расчета полей течений, температуры и солености, динамическую-термодинамическую модель ледового покрова для расчета толщины, сплоченности и скорости дрейфа морского льда. Схема моделирующей системы представлена на рис. 12.

Нарастание и таяние льда зависят от граничных условий на поверхности льда и открытой воды и от потоков тепла на таяние/замерзание льда на нижней границе льда. На поверхности льда и/или моря заданы потоки тепла и импульса, рассчитываемые по полям приземной температуры воздуха, скорости ветра, влажности, давления воздуха и облачности. Численное решение уравнений осуществляется в криволинейно-ортогональной системе координат по горизонтали и смешанной системы координат по вертикали для модели гидродинамики (z- и σ-системы координат).

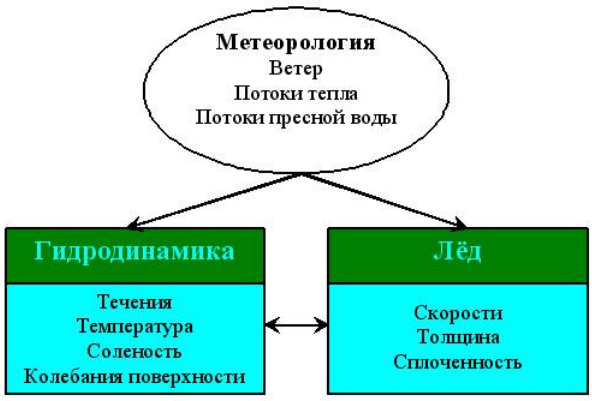


Рис. 12. Схема модели THREETOX

Результаты численного моделирования льда

Моделирующая система была адаптирована к расчетной области, приведенной на рис.13. Использовались данные о поле глубин из базы данных General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (www.gebco.net) с разрешением 0,5′, а также данные из детальных карт глубин в районе порта Певек и проектируемой ПАТЭС. Для расчетов использовалась ортогональная криволинейная сетка с максимальным разрешением в районе проектируемой АЭС около 250 м.

Входными данными для расчетов являются поля метеорологических элементов (приземная температура воздуха, ветер, относительная влажность, облачность, давление воздуха) и значения уровня моря, температуры и солености на открытой границе области. Использовались поля метеорологических элементов, рассчитанные реанализом ERA Interim для 2010-2011 гг. Модель адаптировалась к граничным условиям в период июль-декабрь 2010 г. и расчет производился для января-декабря 2011 г. поскольку 2011 год является характерным для последнего десятилетия. Наблюдения ледового покрова в районе ПАТЭС проводились Государственным океанографическим институтом ГОИН также в 2011 году.

Результаты моделирования ледового покрова в Чаунской губе в период январь-декабрь 2011 года дают распределение толщины, сплоченности и скорости дрейфа льда в Чаунской губе и в районе ПАТЭС для тех месяцев, когда существовал ледовый покров. Для местоположения проектируемой ПАТЭС получены временные ряды толщины льда, сплоченности и модуля скорости. По результатам моделирования построены также розы ледового дрейфа для тех месяцев, когда существовал ледовый покров, и гистограммы модуля скорости для этих месяцев.

Примеры результатов моделирования показаны на рис. 14 и 15. Как следует из результатов моделирования, в январе-апреле происходит нарастание ледового покрова по всей Чаунской губе, толщина которого растет от 1,1 м в январе до 1,7 м в апреле. Сплоченность льда в этот период была около 0,9-1,0 и ледовый покров в этот период находится практически в покое. Суточное смещение льда не превосходит 0,1 м. Расчеты не предсказывают в этот период возможность торошения льда в Чаунской губе, и в частности, в районе ПАТЭС. Доминирующее направление смещений льда в районе ПАТЭС для января – юго-запад, для февраля юго-запад и восток для марта и апреля.

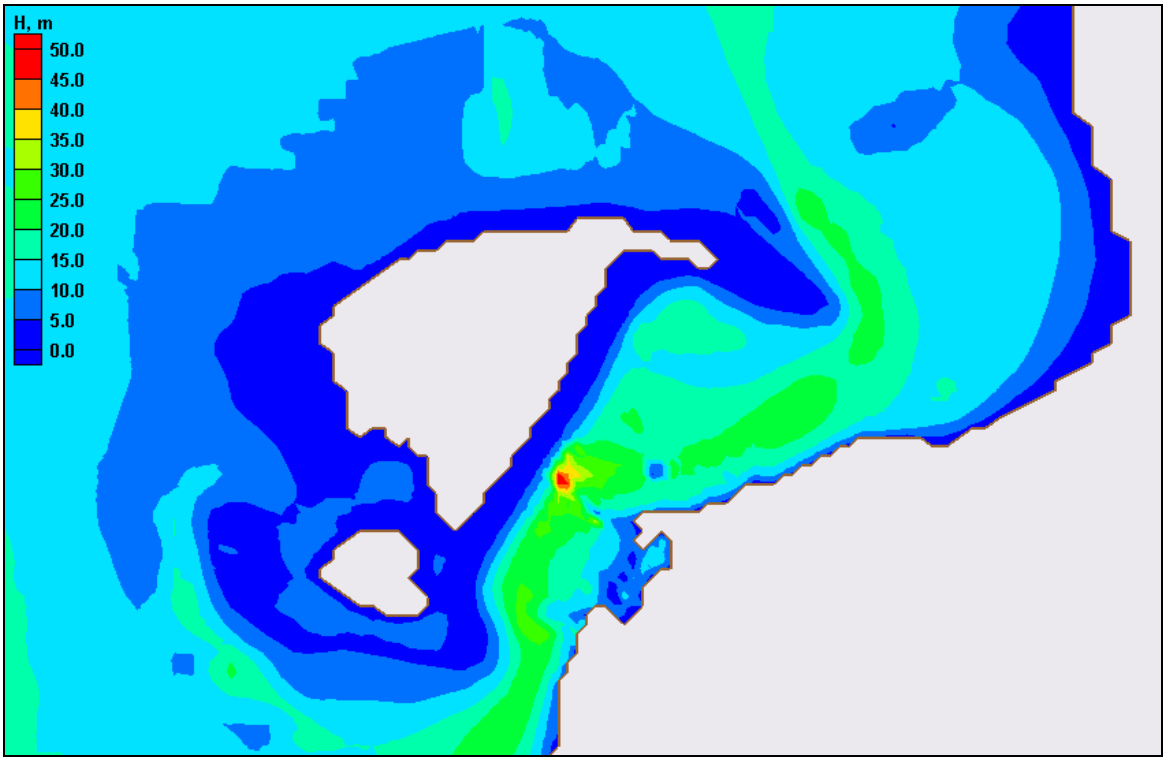


Рис. 13. Распределение глубин в расчетной области в районе ПАТЭС

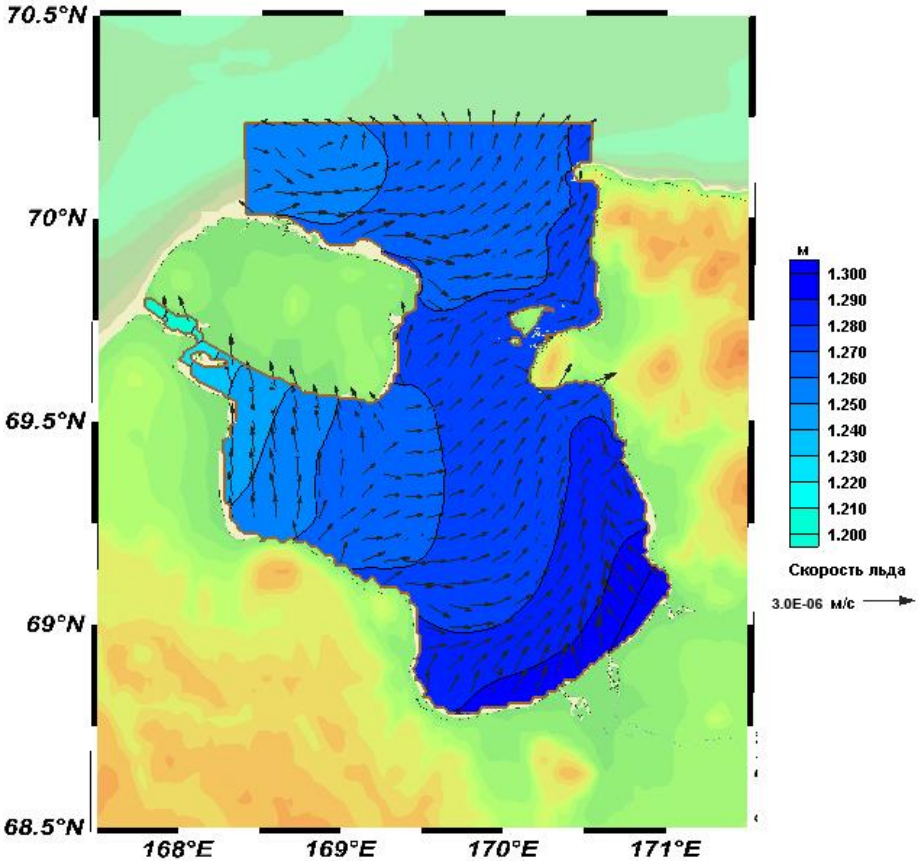


Рис. 14. Распределение толщины и скорости дрейфа льда
в Чаунской губе 15 января 2011 г.

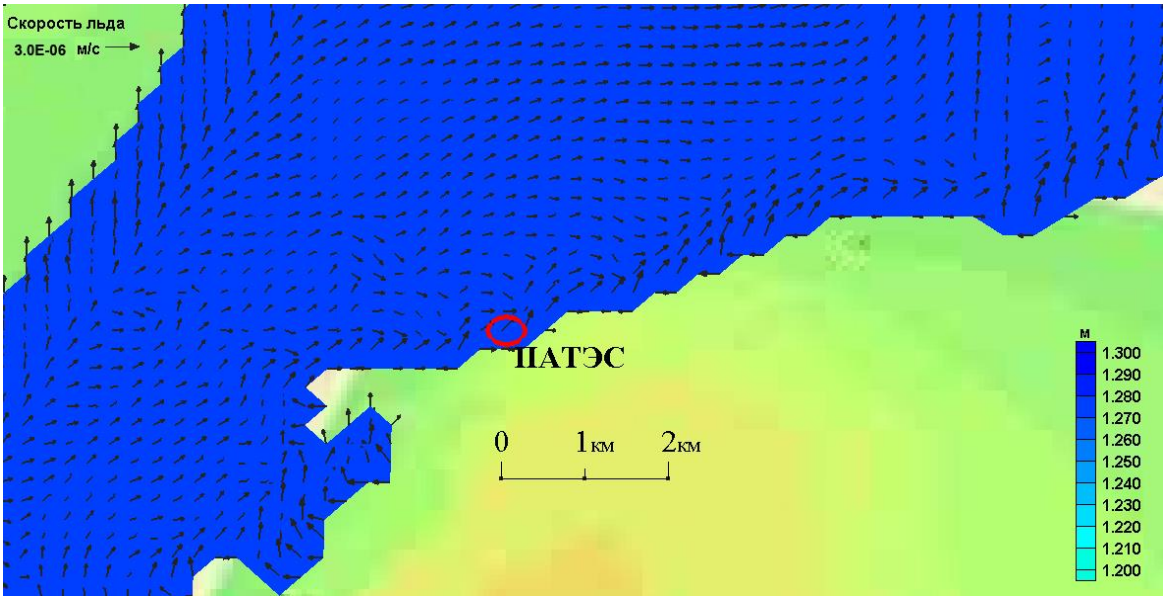


Рис. 15. Распределение толщины и скорости дрейфа льда
в районе ПАТЭС 15 января 2011 г.

Максимальной толщины в 2011 г. лед достигает в мае, в районе ПАТЭС до 1,95 м. Максимальная толщина льда на полярной станции Валькаркай в среднем составляла 1,88 м, что согласуется с данными расчетов для мористой части губы.

Летнее таяние льда начиналось в июне с мористой части губы. В конце июня 2011 года около 20% акватории губы уже свободны ото льда. Толщина ледового покрова уменьшается до 1 м. Начинаются заметные подвижки льда, скорости которых в районе ПАТЭС достигают в конце месяца 2-3 см/с. Доминирующее направление перемещения льда в июне – восток-северо-восток, а значений модуля скорости – менее одного см/с. В июле толщина льда уменьшается до 40 см и сплоченность до 40%. Скорости дрейфа льда в районе ПАТЭС достигают 10-12 см/с, а преобладающее направление дрейфа льда – запад-юго-запад. В первой половине августа толщина и сплоченность льда быстро уменьшаются, а скорости дрейфа растут, достигая в районе ПАТЭС значений 20-25 см/с. К середине августа губа практически очищается ото льда.

В октябре начинается ледостав в южной части губы. Сроки устойчивого ледообразования в районе порта Певек согласуются с результатами многолетних наблюдений, согласно которым средний срок устойчивого ледообразования – 8 октября, минимальные и максимальные сроки – 20 сентября и 18 октября, соответственно. В октябре толщина льда достигала в среднем 20 см, а лед занимал около 20% акватории. Скорости дрейфа в районе ПАТЭС достигают значений 20-25 см/с. Доминирующие направления дрейфа – юго-юго-запад и северо-северо-восток, а скорость около 10 см/с. В ноябре продолжилось нарастание ледового покрова до толщины 40 см. К концу месяца около половины акватории покрылось льдом. Доминирующие направления дрейфа – юго-юго-запад, а скорость 7 см/с. В декабре 2011 г. ледовый покров занимает 80% акватории. Толщина льда достигает к концу месяца 1 м. Доминирующие направления дрейфа – юго-запад, а скорость 0-5 см/с. Заметим, что для октября-декабря 2011 результаты расчета хорошо согласуются с данными многолетних наблюдений на ст. Певек (рис.16).

Результаты численного моделирования динамики льда позволяют реализовать сценарный способ расчета ледовых нагрузок на проектируемые гидротехнические сооружения. Рекомендуется принимать следующие расчетные сценарии (табл. 1).

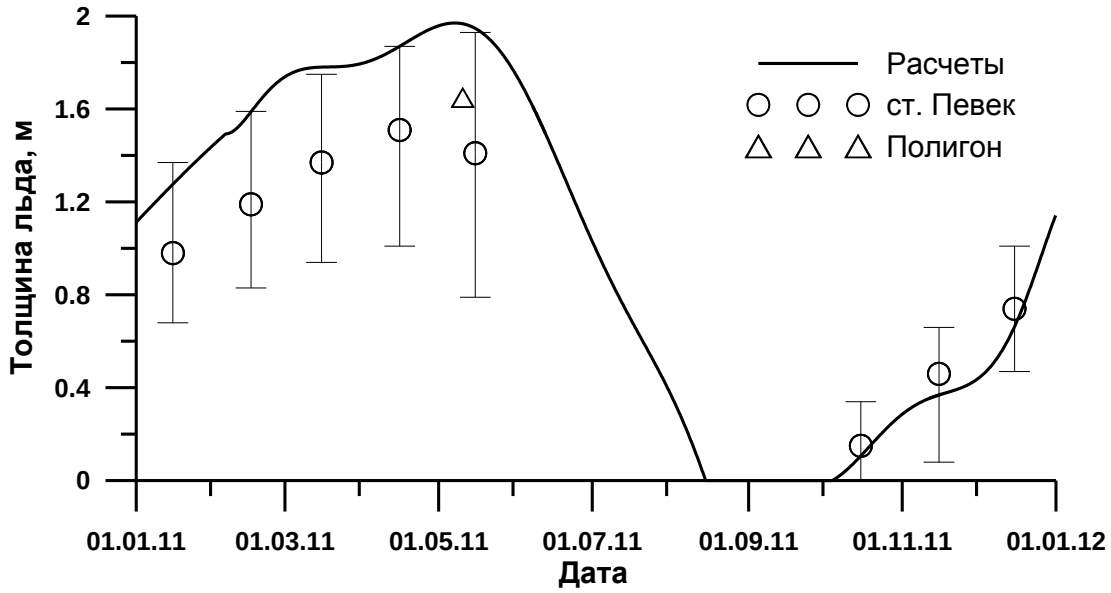


Рис. 16. Толщина льда в районе ПАТЭС в 2011 году в сравнении с наблюдениями на ст. Певек и на полигоне в 2011 г. Кружки – средние значения за 1941-2011 гг., показан также диапазон между максимальными и минимальными значениями толщины льда. Треугольник представляет максимальное значение толщины ледового покрова на полигоне в мае 2011 г.

Таблица 1

Рекомендуемые расчетные сценарии для ледовой нагрузки для порта Певек

№ п/п	*Период расчетного года*	*Толщина льда, м*	*Сплоченность льда, %*	*Модуль скорости дрейфа, м/с*	*Направление дрейфа*
1	май	1,95	100	$1{,}16*10^{-6}$	ЗЮЗ
2	июль	0,4	40	0,11	ЗЮЗ
3	октябрь	0,2	20	0,23	ЮЮЗ
4	Ноябрь-декабрь	1,0	80	0,05	ЮЮЗ, ЮЗ

Моделирование ветровых волн на подходе к порту

В связи с тем, что гидротехнические сооружения порта относятся к особо ответственным и имеют обеспеченность 1 раз в 10000 лет, возникает задача оценки обеспеченности экстремально высоких значений ветроволновых характеристик в условиях изменения климата. Для этой цели используется метод годовых максимумов (МГМ).

В настоящем проекте для расчета обеспеченности волн редкой повторяемости до 1 раза в 10000 лет использован метод МГМ, применяемый к штормам за тридцатилетний период 1981-2010, распределение пиковых значений в которых будет аппроксимироваться с применением GEV (в виде распределения Вейбулла).

Оценке влияния глобальных изменений климата на динамику океанографических процессов в океане посвящено огромное количество работ, обобщение которых представлено в отчетах Международной комиссии по изменениям климата ООН (IPCC, 2007), в монографиях и обзорах. Развитие дистанционных спутниковых методов наблюдений за состоянием мирового океана, позволило си-

стематизировать глобальные изменения в характеристиках экстремальных волн в океане. Общепринятая методология расчетов океанографических параметров в условиях климатических изменений, основана на использовании проекций – сценариев глобальных метеорологических процессов в XXI веке, рекомендованных IPCC, с последующим расчетом глобальными океанологическими моделями изменений уровня моря. Результаты таких расчетов, относительно глобального изменения полей ветра и уровня моря, применены для корректировки расчетов высот волн, скоростей течений и интенсивности размывов в районе строительства ПАТЭС.

Для расчетов характеристик волн в Восточно-Сибирском и Чукотском морях, до глубоководной границы акватории ПАТЭС, будут использоваться: модель SWAN, ветровые поля для расчета которых, будут основываться на данных реанализа NCEP/NCAR полей ветра в период с 1981 по 2011 годы, с привлечением для корректировок данных, уточненных по спутниковым наблюдениям и измерениям волн в регионе.

Результаты расчетов моделью SWAN используются, как граничные условия для модели HWAVE–S – полуспектральной модели, которая, основываясь на уравнениях пологих склонов, позволяет успешно описывать дифракционные эффекты и эффекты отражения волн от оградительных сооружений, что является особенно важным для области, примыкающей к оградительным молам ПАТЭС.

За указанный 20-летний период выбраны не менее 30 самых сильных штормов. Аналогичные расчеты проведены для сценариев максимально возможного в XXI столетии шторма, с учетом поправок на изменения уровня моря и скорость ветра, в соответствии с существующими исследованиями климатических глобальных изменений.

Такая методология принята, исходя из того, что требования к расчетным характеристикам экстремальных волновых параметров 1 раз в 10000 лет, не означает, что надо рассматривать не период в 10000 лет непрерывной работы ПАТЭС, а только риски реализации такого экстремального явления как волны шторма обеспеченности раз в 10000 лет в течение XXI века, что и обосновывает использование сценариев изменений климата в XXI веке для расчета такой обеспеченности.

Расчеты ветровых полей проводились на неструктурированной сетке, покрывающей Восточно-Сибирское море с 150° до 178° Вс. долготы и на север до 80° Св. широты (рис.17). Количество узлов расчетной сетки – 94143, элементов – 185910. Линейный размер элементов в акватории ПАТЭС – около 2,5 м.

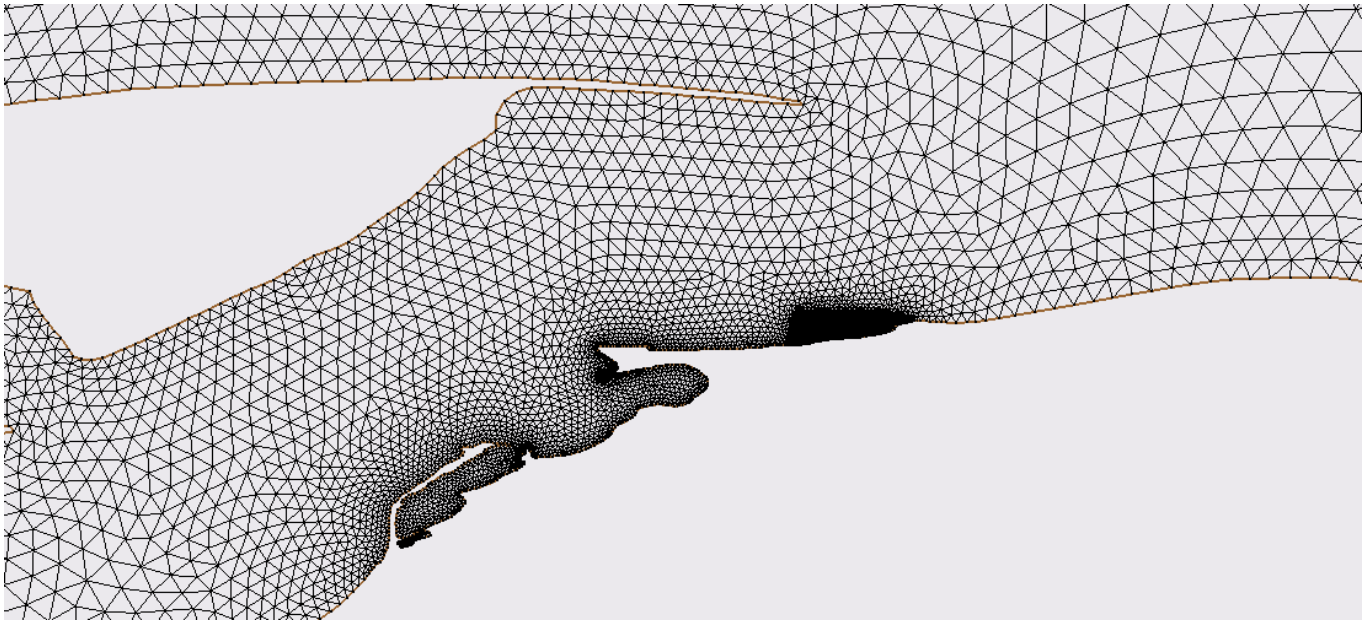


Рис. 17. Фрагмент сетки для расчетов ветрового волнения в районе г. Певек

Для расчета экстремальных ветровых волновых полей за 30-летний период с 1981 по 2011 гг. было отобрано 37 штормовых сценариев.

Выбирались те периоды экстремальных ветров с июля по сентябрь, в которых средняя скорость ветра в районе Чаунской губы превышала 10 м/с. Результаты расчетов волнового поля для этой даты приведены на рис. 18.

Для построения экстремальных волновых полей различной повторяемости, были отобраны максимальные за каждый год значения высот волн в 993 точках узлах прямоугольной сетки с размером ячейки 22 м для района акватории ПАТЭС. Для каждой точки сетки были получены параметры распределения Вейбулла, по которым были вычислены значения высот волн редкой повторяемости. Карты возможных больших ветровых волн повторяемости 1 раз в 1000 и 10000 лет, приведены на рис. 19 и 20. Точками показано расположение предполагаемых волнозащитных молов ПАТЭС.

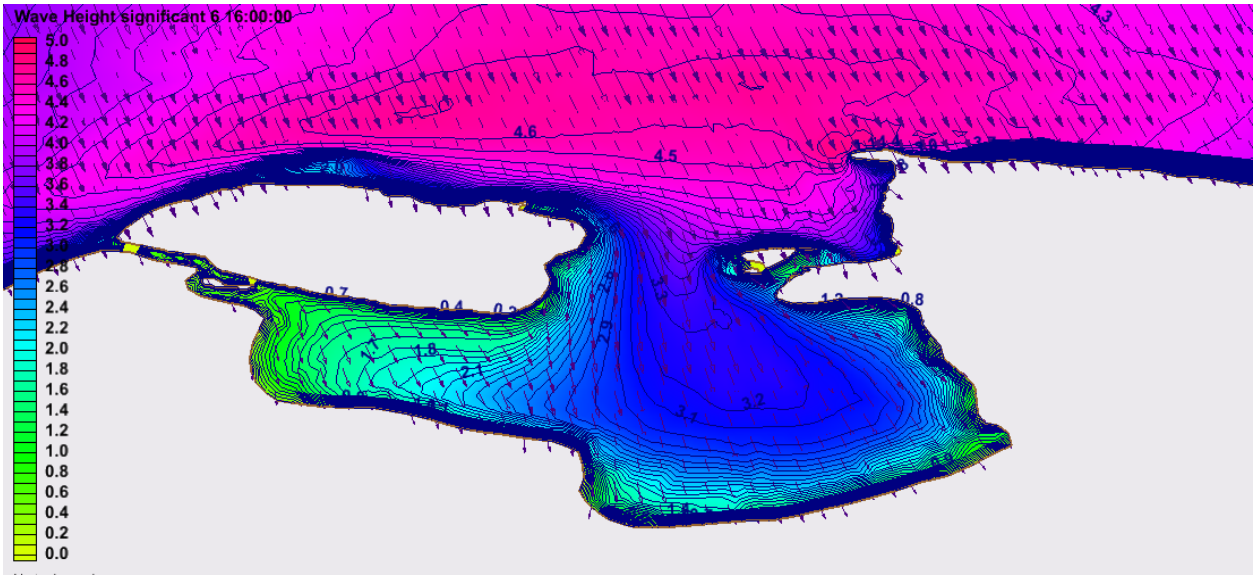


Рис. 18. Высоты и направления значительных волн во время шторма 07.07.2008 в Чаунской губе

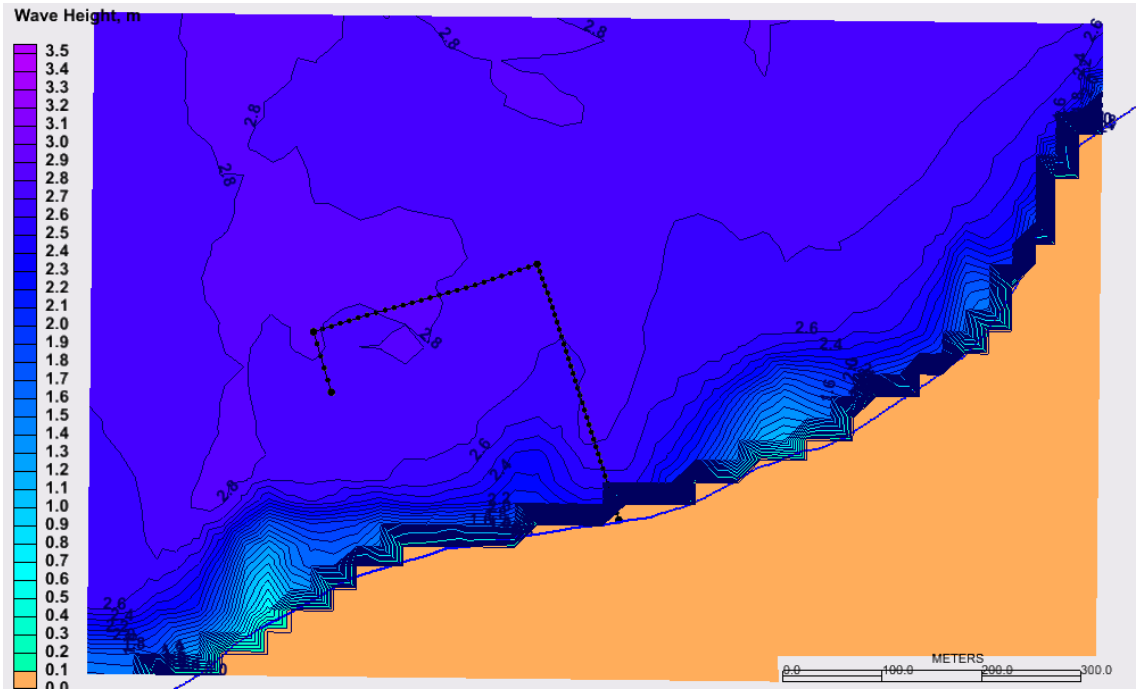


Рис. 19. Высоты значительных волн, возможных раз в 1000 лет

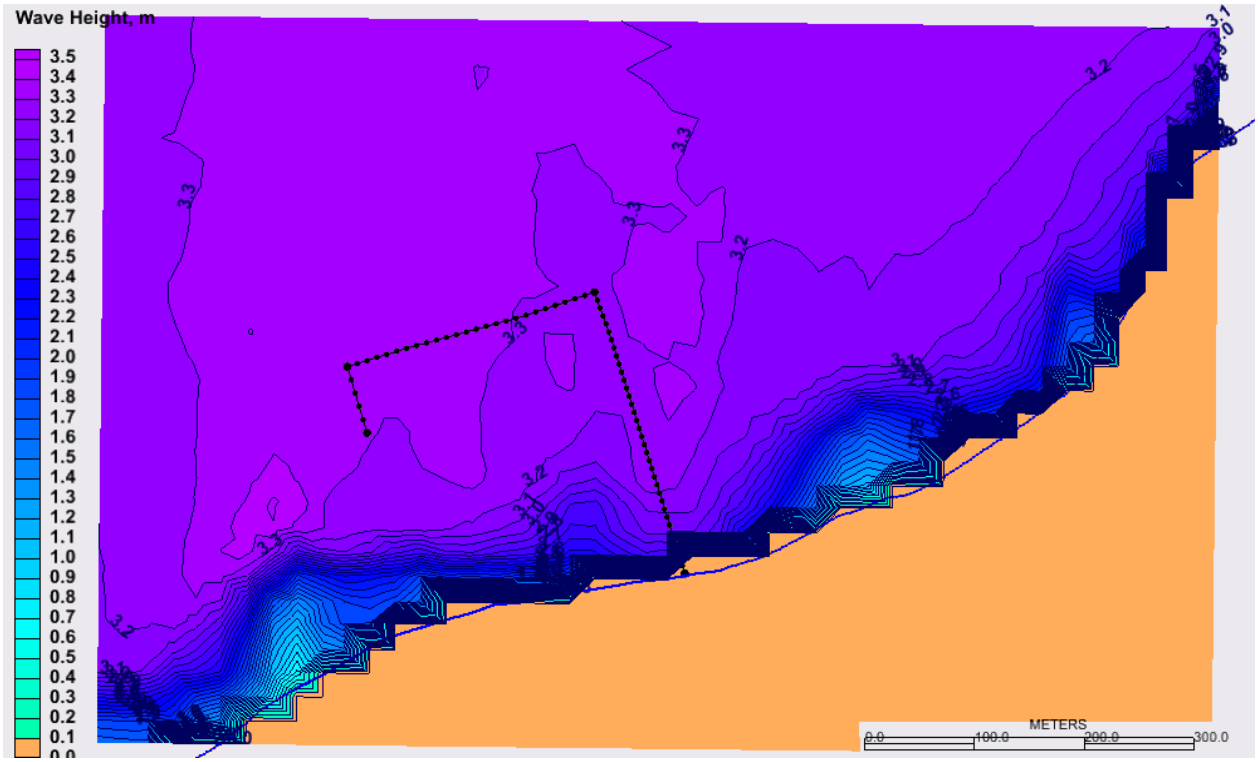


Рис. 20. Высоты значительных волн, возможных раз в 10000 лет

Выводы

1. Приведены результаты моделирования ледового покрова в Чаунской губе для 2011 года, проведенные с помощью моделирующей системы ТРИТОКС, включающей модель течений, температуры, солености и уровня воды и модель динамики-термодинамики льда. Результаты расчетов показали, что максимальные толщины ледового покрова в районе ПАТЭС имеют место в апреле-мае и могут достигать 1,95 м. Сформированный припай в этот период устойчив с суточными перемещениями порядка 10 см. Результаты расчетов ледовых полей удовлетворительно согласуются с данными полевых наблюдений в 2011 г. и данными наблюдений на гидрометеорологических станциях.

2. Разработана числовая модель генерации и трансформации волн на основе адаптации модели SWAN на неструктурированной сетке, покрывающей Восточно-Сибирское море с 150° до 178° Вс. долготы и на север до 80° Св. широты. Ячейки сетки сгущаются к акватории ПАТЭС, уменьшаясь в этом регионе до характерного размера: около 2,5 м. Для расчета экстремальных ветро-волновых полей за 30-летний период с 1981 по 2011 гг., было отобрано 37 штормовых сценариев. Выбирались те периоды экстремальных ветров с июля по сентябрь, в которых средняя скорость ветра в районе Чаунской губы превышала 10 м/с. Получены поля волн для всех указанных штормов в регионе ПАТЭС, статистическая обработка которых, позволила получить волновые поля значимых (13% в системе шторма) волн повторяемостью в 5, 10, 25, 50, 100, 1000 и 10000 лет. На расстоянии примерно 300 м от берега, высота значительных волн указанной повторяемости изменятся в диапазоне от 1,3 до 3,4 м.

Библиографический список

1. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Минстрой России, 1989. 41 с.
2. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.

3. International Standard ISO/FDIS 19906. Petroleum and Natural Gas Industries – Arctic Offshore Structures. ISO 2010, 466 p.
4. Мишель Б. Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения и суда. – М.: Транспорт, 1978, 112 с.
5. Кульмач П.П. Морские сооружения для освоения полярного шельфа. – М.: 26 ЦНИИ МО РФ, 1999, 336 с.
6. Mellor G., Kantha L. (1989). An ice-ocean coupled model. J. Geophys. Res., 94, pp. 10837-10954.
7. Koziy L., Maderich V. (1997). A simulation of seasonal sea ice dynamics in coastal areas. Proc. 1-st International Conference "Port, Coast, Environment". Varna, v. 2, 220-228.
8. Koziy L., Maderich V., Margvelashvili N., Zheleznyak M. (1998). Three-dimensional model of radionuclide dispersion in the estuaries and shelf seas. J. Environmental Modeling and Software, 13 (5-6), pp. 413-420.
9. Johannessen, O.M., Volkov, V.A., Pettersson, L.M., Maderich, V.S., Zheleznyak, M.J., Gao, Y., Bobylev, L.P., Stepanov, A.V., Neelov, I.A., Tishkov, V. Nielsen, S.P., (2010) Radioactivity and Pollution in the Nordic Seas and Arctic Region. Observations, Modelling and Simulations. Springer, Series: Springer Praxis Books, 408 pp
10. Margvelashvili N., Maderich V., and Zheleznyak M. (1997). THREETOX - a computer code to simulate three-dimensional dispersion of radionuclides in stratified water bodies. Radiation Protection Dosimetry, 73, Nos 1-4, pp. 177-180.
11. Maderich V., Heling R., Bezhenar R., Brovchenko I., Jenner H., Koshebutskyy A., Kuschan A., Terletska K. (2008). Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters. Hydrological Processes, DOI: 10.1002/hyp.6985.
12. Научно-технический отчет «Ледовые условия и оценки возможных ледовых нагрузок на защитные сооружения около АЭС на побережье Восточно-Сибирского моря» // СПб: ГУ ААНИИ, 2010.
13. Alexander L. and Tebaldi C. (2012) Climate and Weather Extremes: Observations, Modelling, and Projections, Chapter 10 in the book "The Future of the World's Climate (Second Edition), A.Henderson-Sellers and Kendal McGuffie (Eds), p.253-289.
14. Lowe, J.A., Woodworth, P.L., Knutson, T., McDonald, R.E., McInnes, K.L., Woth, K., von Storch, H., Wolf, J., Swail, V., Bernier, N.B., Gulev, S., Horsburgh, K.J., Unnikrishnan, A.S., Hunter, J.R. and Weisse, R. (2010) Past and Future Changes in Extreme Sea Levels and Waves, in Understanding Sea-Level Rise and Variability (eds J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup and W.S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. p.326-375 doi: 10.1002/9781444323276.ch11
15. Weisse R., von Storch H. (2010) Marine climate and climate Change. Storms, Wind Waves and Storm Surges, Springer Praxis Books DOI: 10.1007/978-3-540-68491-6, -216 p.
16. Young, I.R., Zieger, S., and Babanin, A.V. (2011) .Global trends in wind speed and wave height, Science, 332, 451-455.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ МОРСКИХ ПОРТОВ

Спиридонов Александр Владимирович

Заведующий лабораторией «Энергосберегающие технологии в строительстве» НИИ строительной физики РААСН, Президент Ассоциации АПРОК, Лауреат Премии Правительства РФ, кандидат технических наук

АННОТАЦИЯ

Сформулированы основные проблемы энергосбережения в строительной отрасли России, даны предложения по разработке алгоритма программ энергосбережения для различных типов зданий и сооружений, для акваторий морских портов, а также приведены некоторые отечественные инновационные разработки, направленные на повышение энергетической эффективности в строительстве новых зданий, реконструкции и капитальном ремонте существующих зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Здания и сооружения, Программа энергосбережения, Инновационные разработки, Капитальный ремонт, Реконструкция, Энергосбережение, Энергоэффективность, Сооружения морских портов

Введение

В ближайшие 10-15 лет перед нашей страной стоит необычайно амбициозная цель – освоение арктического побережья страны. Это связано как с необходимостью защиты этих обширных территорий, их развитием в связи с развитием богатых месторождений природных ископаемых, там расположенных, так и с началом постоянной навигации по Северному морскому пути.

Достижение этой цели будет сопровождаться необходимостью выполнения множества сложных технологических задач и проблем в строительной области, среди которых можно выделить следующие:

1. Экстремальные климатические условия в предполагаемых местах нового строительства, реконструкции и капитального ремонта существующих зданий (в том числе, очень низкие температуры в зимний период, высокие температуры в летний период, агрессивная среда, сильные ветры и пр.).
2. Отсутствие в большинстве районов предполагаемого строительства газопроводов, других источников энергии, что требует максимального использования энергосберегающих материалов и технологий.
3. Огромные проблемы с доставкой строительных материалов в места предполагаемого строительства, что вызывает необходимость дополнительной проработки вопросов минимизации строительных конструкций, учитывая и ресурсосбережение, и энергосбережение.
4. Необходимость создания максимально комфортной среды в рабочих и жилых помещениях для компенсации депрессивной наружной обстановки в месте строительства, что позволит повысить привлекательность работы и проживания персонала в арктических условиях.
5. Необходимость постоянного мониторинга и прогнозирования изменения наружных условий, а также проведения мероприятий для их компенсации, что вызвано мировыми тенденциями изменения климатических условий и глобальным потеплением, что наиболее серьезно влияет на российские арктические регионы.

Помимо строительства новых портовых комплексов, в арктических регионах предполагается также комплексная реконструкция уже существующих. При этом необходимо учитывать все перечисленные выше задачи и проблемы.

Современная ситуация с энергосбережением в РФ [1-3]

После принятия Федерального закона №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности…» прошло более 5 лет, однако ни в строительстве, ни в жилищно-коммунальном хозяйстве страны не наблюдается серьезных успехов в этом направлении. Более того, в ряде регионов программы энергосбережения практически сворачиваются, что объясняется, в том числе, и довольно сложной экономической ситуацией.

Одним из основных документов, разработанных в поддержку и развитие Закона №261-ФЗ, стала действующая в настоящий момент Государственная Программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года», принятая распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. №2446-р.

Целью этой Программы является снижение энергоемкости ВВП к 2020 году уже на 13,5%. Программа является межотраслевой, т.е. охватывает всю экономику РФ. Как видно, Программа несколько скорректировала первоначальные задачи – цифра 13,5% значительно ниже 40%.

Плюсами этой Программы является то, что в ее составе есть раздел «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в жилищном фонде», предусматривающий достижение суммарной экономии первичной энергии в объеме 29,18 миллионов тонн условного топлива на I этапе (2011-2015 годы) и 97,83 миллионов тонн условного топлива за весь срок реализации Программы (2011-2020 годы).

Также в составе Программы имеется раздел «Стимулирование энергосбережения и повышения энергетической эффективности в субъектах Российской Федерации», предусматривающий стимулирование реализации региональных и муниципальных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, а также определение порядка предоставления из федерального бюджета субсидий бюджетам субъектов РФ на реализацию региональных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Минусами Программы является то, что она не содержит каких-либо конкретных требований к оптимизации и повышению теплотехнических характеристик строительных конструкций, а также обеспечения оценки экономической и энергетической эффективности строительных материалов, элементов в процессе их эксплуатации и в целом жизненном цикле. К сожалению, 18 августа 2011 года распоряжением Правительства РФ №688 был отменен пункт Программы, детально прописывающий ежегодный объем финансирования каждого ее раздела. По сути, довольно удачную и достаточно грамотную программу лишили смысла. В настоящий момент и эта программа носит чисто декларативный характер.

Необходимость проведения мероприятий по энергосбережению в Российской Федерации обосновывается и тем, что в период с 1917 года по 2000 год в нашей стране было построено более 3,5 миллиардов квадратных метров только жилых зданий, энергетические потери в которых не отвечают современным требованиям. Так, по данным 2012 г. (Министерство регионального развития РФ) средние затраты на отопление в жилых зданиях на всей территории России составляют 350-380 кВт час/кв.м в год (в 5-7 раз выше, чем в Германии и других странах ЕС), а в некоторых типах зданий они достигают 680 кВт час/кв.м в год. Более того, по данным Мосгосэкспертизы, несмотря на то, что в СНиП 23 02-2003 «Тепловая защита зданий» для многоэтажных зданий, проектируемых для г. Москвы был установлен предел в 95 кВт час/кв.м в год, в построенных зданиях (что было установлено неоднократными проверками зданий, возведенных в 2003-2010 годах) затраты на отопление находились в пределах 150-180 кВт час/кв.м в год. С учетом

постоянного роста тарифов на тепловую энергию такая ситуация является чрезвычайно опасной с точки зрения энергетической безопасности страны.

Основные потери в типовом многоэтажном здании приходятся на горячее водоснабжение (47%) и нагрев инфильтрующегося воздуха (31%). Именно здесь находятся основные резервы энергосбережения. Теплопотери через ограждающие конструкции (стены, окна, крышу и пр.) составляют всего 22%. Следует отметить, что эти данные приведены для уже повышенных в соответствии с СП 50.13330.2012. «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003». Конечно, для повышения энергетической эффективности зданий старой постройки необходимо проводить утепление стен и замену светопрозрачных конструкций, теплотехнические характеристики которых существенно ниже того, что предусмотрены в современных нормативных документах. Однако, для новых зданий основной резерв энергосбережения заключается в совершенствовании инженерных систем.

В соответствии с Федеральным законом №261-ФЗ в 2009 году в ряде крупнейших городов Российской Федерации начались работы по капитальному ремонту и санации многоэтажных зданий 1970-х – 1980-х годов постройки (ответственным за эту абсолютно необходимую в условиях России работу была определена Государственная Корпорация – Фонд Содействия реформирования Жилищно-Коммунальному Хозяйству). В рамках этой программы проводилось дополнительное утепление стен, замена окон и модернизация некоторых инженерных систем. Однако, по ряду причин (выбор самых дешевых вариантов реконструкции, невозможность коренного улучшения систем отопления в домах старых серий для установки систем учета, отсутствие возможности организации систем вентиляции) эффект от этих работ был незначительным – удалось добиться снижения удельных затрат на отопление не более, чем на 10-15%, что явно недостаточно и, к сожалению, в худшую сторону отличается от результатов санации аналогичных зданий в Германии. Представляется, что различие в эффективности связано с более продуманными и комплексными проектами реконструкции старых зданий, разработанными нашими европейскими партнерами.

В большинстве крупнейших городов России теплоносители в здания доставляются от ТЭЦ, построенных еще в советскую эпоху. Как правило, они расположены достаточно далеко от потребителей. Расстояния и изношенность сетей приводят к огромным потерям – до 40-50% от всей вырабатываемой энергии, направляемой на отопление зданий. Это является одним из самых главных ресурсов возможной экономии энергии в стране. В последние годы проводится довольно много работ по созданию в многоэтажных зданиях так называемых «крышных котельных». Однако пока они используются явно недостаточно. Кроме того, в случае массового использования локальных систем отопления образуется значительный дисбаланс на ТЭЦ, где горячая вода и пар вырабатываются одновременно с производством электроэнергии. В случае замены источника теплоносителя на локальные имеется опасность, что горячая вода и пар будут отрицательно воздействовать на экологическую ситуацию в крупных городах.

Любая программа энергосбережения предполагает обязательный учет, контроль и возможность регулирования параметров микроклимата помещений. В многоэтажных зданиях, построенных в России до 2000 года, из-за конструктивных особенностей систем раздачи тепла практически невозможно обеспечить возможность установки приборов учета расхода тепла, что приводит и к отсутствию реального учета поквартирного расхода тепла, а также к тому, что при замене существующих неэффективных конструкций, например, окон, на новые, из-за «перетопа» владельцы квартир просто открывают их, практически «убивая» все затраты государства на энергосбережение.

До сих пор в российском строительстве не решена проблема использования как в старых, так и во вновь строящихся зданиях современных систем вентиляции, использую-

щих в том числе и рекуператоры. Во всех многоэтажных жилых зданиях в России предусмотрена система естественной вентиляции, которая или не действует вообще (все знают о встроенных холодильниках в вентиляционных каналах), или работает неэффективно (особенно в летний период, когда имеются массовые случаи «опрокидывания» вентиляции). Это приводит как к дополнительным теплопотерям, так и к ухудшению качества воздуха в помещениях. Улучшение этой ситуации возможно только при кардинальном изменении системы проектирования.

Российская Федерация стоит перед сложной задачей по реновации, повышению комфортности и тепловой модернизации большей части ранее построенных зданий, сооружений, а также и инфраструктуры в городах и населенных пунктах. Это связано с неудовлетворительным состоянием многих строительных и инженерных сооружений. Незначительный объем ремонта в прошлые периоды привел к значительным физическим и структурным повреждениям зданий и сооружений, которые с учетом общего возраста построек ведут к снижению остаточного срока их эксплуатации. С учётом огромного общего объема жилого фонда встает вопрос, возможно ли адекватно и своевременно провести необходимые улучшения или дополнительные мероприятия по санации этих зданий во избежание серьезных социальных и других проблем.

Сегодня в России многие тепловые сооружения являются технологически и экономически неэффективными и находятся в аварийном состоянии, поскольку запланированный срок их эксплуатации давно истек. Показатели удельного потребления энергии и выбросов вредных веществ находятся выше среднего международного уровня, а показатели качества жилья, наоборот, намного ниже.

В конце прошлого века использование в развитых (да и во многих развивающихся, например, в Китае) странах нетрадиционных и альтернативных источников энергии – за счет применения тепловых насосов, ветровых генераторов, солнечных коллекторов и солнечных батарей, многих других устройств – стало в массовом строительстве совершенно обыденным делом. К сожалению, они все еще считаются какой-то экзотикой в России, хотя вполне могут быть (и должны стать!) необходимым элементом и своеобразным «локомотивом» отечественного строительства.

В частности, в России практически не используются на сегодняшний день альтернативные источники энергии – энергия Солнца, ветра, Земли. В то же время, территории, где можно их использовать для обеспечения дополнительного энергосбережения, очень велики. Так, солнечную энергию можно использовать не только на территории Южного Федерального округа, но и в Восточной Сибири (зона БАМ, Байкальский регион, многие другие территории), ветроэнергетические установки также будут эффективны в Сибири, Калмыкии, многих других регионах. Следует, однако, иметь в виду, что рациональность и эффективность использования таких мероприятий необходимо тщательно обосновывать с учетом места строительства.

На сегодняшний день следует констатировать, что:

- в России работа по энергосбережению в строительстве ведется недостаточно продумано, ряд Федеральных законов, Постановлений Правительства, необходимых подзаконных актов разработаны в спешке и имеют многочисленные недоработки, а к разработке многих еще даже и не приступили;
- в связи с тем, что нет необходимых статистических данных для определения многих показателей энергосбережения, большинство региональных программ грешат неточностями и необъективны;
- нет разработанных программ по поддержке потребителей и производителей, выпускающих энергосберегающую продукцию;
- действующие методики по составлению энергетических паспортов зданий и проведения энергетического аудита достаточно формальны и до сегодняшнего дня практически не оказывают влияния на реальный уровень энергосбережения в стране;
- в России до сих пор нет собственной системы стандартов и Строительных Норм и Правил, которые направлены на энергосбережение. Их разработка потребует значи-

тельных средств и времени – простой перевод европейских норм не всегда возможен из-за значительных отличий в климатических условиях Европы и России. Только недавно Национальным объединением строителей (НОСТРОЙ) был принят план разработки нескольких стандартов, в то время как в ЕС действует около 70 нормативных документов, поддерживающих соответствующую Европейскую Директиву (Energy Performance Building Directive);

- новые технологии, направленные на энергосбережение, тяжело продвигаются в нашей стране из-за того, что продукция, изготавливаемая с их использованием, является более дорогой по сравнению с обычной.

Сказанное выше необходимо учитывать при разработке проектов и строительстве зданий в акваториях морских портов – как действующих, так и вновь проектируемых и строящихся.

В следующем разделе настоящей статьи даны рекомендации по созданию программ энергосбережения для различных типов зданий и сооружений – жилых, общественных, промышленных.

Рекомендации по разработке отраслевых и региональных программ энергосбережения

Абсолютно обязателен комплексный подход к малозатратным энергосберегающим и экологичным технологиям в зданиях – мировой опыт показывает, что поэлементные требования к конструкциям и оболочке здания, различным составляющим инженерных систем обеспечения комфортного уровня микроклимата помещений приводит в результате к значительному перерасходу энергии в годовом цикле.

Необходимо использовать уже имеющийся многолетний опыт европейских стран при переходе на современные требования к энергосберегающим мероприятиям и гармонизацию нормативных документов с их Европейскими аналогами, однако, необходимо учитывать климатические и ресурсные особенности территорий Российской Федерации.

Необходимо предусматривать при разработке комплексных мер в области энергосбережения в развитии действующих морских портов наличие значительного числа старых зданий, требующих реконструкции теплозащиты, систем отопления и вентиляции.

Необходимо широко использовать имеющийся практический опыт проектирования и использования передовых инновационных технологий на реальных пилотных объектах в России. Однако следует иметь в виду, что большинство зданий, построенных в различных регионах России как «Энергоэффективные», являются таковыми достаточно условно, т.к. в них не использовался весь комплекс возможных современных энергосберегающих мероприятий.

Необходимо шире использовать нетрадиционные и возобновляемые виды энергии, в том числе, для создания локальных автономных инфраструктурных инженерных систем. Это является одним из приоритетных направлений энергосбережения в развитых странах. В Российской Федерации в последние годы разработаны новые конструкции и системы с использованием возобновляемых источников энергии. Однако этот опыт до сих пор слабо востребован в России. Именно при проектировании новых зданий на территориях перспективных морских портов в экстремальных условиях приполярных регионов необходимо постараться учесть все перспективные отечественные и зарубежные разработки.

В частности, достаточно актуально налаживание производства в России МИНИ- и МИКРОТЭЦ на основе микротурбин и электрохимических генераторов. Они существенно расширяют возможности автономного энергообеспечения зданий и поселков, и что особенно важно – и на основе использования различных видов биотоплив, производимых, в том числе, из отходов. Этот вопрос следует решать в рамках межминистерской координации.

Помимо разработки федеральной комплексной программы энергосбережения в строительстве и ЖКХ, необходима разработка и аналогичных отраслевых и региональных программ. Как правило, даже положительные инициативы федеральных органов сильно

тормозятся или блокируются на отраслевом и региональном уровнях – как из-за нежелания дополнительной работы, так и в связи с отсутствием необходимого финансирования.

При разработке отраслевых и региональных Программ энергосбережения в строительстве следует обратить внимание на следующие основные моменты:

1. Разработка в каждом из регионов и для каждого проектируемого комплекса строящихся и/или реконструируемых комплексов портовых сооружений Перечня первоочередных мер по энергосбережению (простых, доступных и проверенных в аналогичных климатических условиях) с обоснованием их эффективности.

2. Разработка Отраслевых Региональных Методических Документов (ОРМД) и подготовка их правовой легитимизации для обеспечения обязательности требований ряда федеральных и региональных документов, направленных на энергосбережение при проектировании, строительстве, реконструкции и капитальном ремонте зданий различного назначения (включая повышенные теплотехнические требования к светопрозрачным и фасадным конструкциям), финансируемых за счет бюджета.

3. Разработка с учетом п.2 региональных СТО по проектированию и монтажу конструкций, обеспечивающее обязательное использование энергосберегающих конструкций с обоснованными повышенными требованиями к удельному энергопотреблению.

4. Разработка приложений к тендерной документации в соответствии с пп. 2-3, оговаривающего минимально возможные теплотехнические характеристики ограждающих конструкций для региональных климатических условий при проектировании, строительстве и реконструкции зданий портовых комплексов за счет бюджетного финансирования.

5. Создание и скорейшее внедрение отраслевых и региональных систем маркировки энергоэффективных материалов и наружных ограждающих конструкций (целесообразно начать со светопрозрачных конструкций), предлагаемых к использованию при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте на территории региона/портового комплекса, для исключения применения «некондиционной» продукции. Маркировка должна сопровождаться аттестацией (аккредитацией) монтажных компаний.

6. Разработка Руководства по проектированию энергосберегающих зданий в климатических условиях региона/портового комплекса с учетом апробированных отечественных и зарубежных решений в аналогичных климатических условиях для массового использования в отраслевых проектных институтах (с применением «рейтингового» метода оценки проектных решений).

7. Разработка Альбомов инновационных технических решений, технологий и материалов, применяемых при проектировании, строительстве, текущем и капитальном ремонте зданий (помещений) портовых комплексов, финансируемых за счет бюджетов РФ и региона, а также в реализации региональной программы «Энергосбережение» (с применением «рейтинговой» системы оценки и обоснованием эффективности предложенных решений).

8. Разработка программы популяризации среди инвесторов (заказчиков), а также населения идеи энергосбережения и использования энергоэффективных материалов, конструкций и решений для снижения теплопотерь при эксплуатации зданий (включая использование энергосберегающих светопрозрачных и фасадных конструкций, систем вентиляции, пр.).

9. Разработка в соответствии с Федеральным законом №261-ФЗ отраслевой и региональной системы субсидирования потребителей и производителей энергосберегающей продукции, соответствующей и превышающей требования энергетической эффективности в строительстве для климатических условий в регионе расположения портовых комплексов.

10. Проработка возможности использования при проектировании, оценке и экспертизе проектов и уже построенных зданий современных сертифицированных в установленном порядке для применения в РФ компьютерных методов определения теплотехнических и других характеристик.

11. Создание Отраслевого и Региональных научно-внедренческих Центров энергосбережения и использования вторичных энергоресурсов, возобновляемых источников энергии в строительстве с обеспечением необходимого финансирования со стороны отраслевого и региональных бюджетов, а также и средств Российского Энергетического Агентства и предоставлением соответствующих полномочий. НИИСФ РААСН готов оказывать консультационную и практическую помощь при организации и функционировании Центра.

12. Создание Отраслевой и Региональных Служб энергетической и экологической экспертизы проектов и зданий портовых комплексов с приданием им функций обязательной оценки всех проектов и выдачи заключения по разрешению на строительство и реконструкцию, разработкой регламентов по проведению экспертиз и инструментальной оценки, закупкой за счет отраслевого и региональных бюджетов современного оборудования.

13. Подготовка к проведению сплошной проверки реальных теплотехнических и энергосберегающих характеристик всех построенных зданий на территориях портовых комплексов и прилегающих территориях, намечаемых к реконструкции, с выдачей соответствующих заключений об их реальных характеристиках, а также с решениями о замене некондиционных материалов и конструкций. Для проведения этой работы необходимо привлечение независимых экспертов и высококлассных специалистов.

14. Проведение обязательного обучения специалистов государственных органов, ответственных за оценку соответствия, согласно отраслевой и региональным программам «Энергосбережение». НИИСФ РААСН готов организовать систему обучения как на базе отечественных (например, НИИ строительной физики РААСН) и зарубежных (например, iftRosenheim – Германия, CSTB– Франция, других) испытательных центров, организаций и лабораторий.

15. Проведение обучения представителей крупных отраслевых и региональных застройщиков и компаний, осуществляющих поставки и монтаж энергосберегающих материалов, технологий, изделий и конструкций (включая светопрозрачные и фасадные конструкции), требованиям новых отраслевых и региональных методических документов по энергосбережению.

16. Подготовка к проектированию пилотных энергосберегающих зданий на территориях новых портовых комплексов с привлечением авторитетных отечественных и зарубежных компаний и проведение мониторинга от момента начала строительства и в течение года после его сдачи.

Предложения по использованию современных светопрозрачных конструкций [4-7]

Светопрозрачные конструкции являются самым «слабым» элементом ограждающей оболочки здания с точки зрения теплотехнических характеристик. Так, минимально необходимые значения приведенного сопротивления теплопередаче стен, а также окон и балконных дверей для условий г. Москвы в соответствии с нормами 1995 г. отличались в 2,94 раза (1,0 и 0,34 $м^2 \cdot °С/Вт$), а в последнем общероссийском документе 2012 г. – в 5,80 раз (3,13 и 0,54 $м^2 \cdot °С/Вт$). Правда, в московских нормативных документах, предназначенных для проектирования зданий, начиная с 2016 г., это соотношение несколько уменьшено – «всего» 3,8 раза (3,80 и 1,00 $м^2 \cdot °С/Вт$).

С точки зрения строительной теплофизики для экономии энергии на эксплуатацию зданий более выгодным, конечно, кажется вообще не использовать светопрозрачные конструкции. Однако применение естественного освещения является пока обязательным по санитарным нормам как в жилых и общественных, так и в большинстве производственных зданий. Нерациональность строительства безоконных зданий была доказана еще в 40-х – 60-х годах прошлого века.

В связи с изложенным выше основные реальные теплопотери из помещений происходят именно через светопрозрачные конструкции – от 30 до 60% от общих теплопотерь зданий через ограждающие конструкции (в зависимости от конструкции окон и фаса-

дов, климатических условий, методики оценки и ряда других показателей). Особенно внимательно необходимо подходить к проектированию светопрозрачных конструкций в зданиях, расположенных в районах с экстремальными климатическими условиями.

На сегодняшний день большинство серьезных компаний, изготавливающих светопрозрачные конструкции, могут без значительных проблем массово производить окна и фасады с приведенным сопротивлением теплопередаче 0,8-0,9 м^2·°С/Вт. Однако, для того чтобы добиться значений этого показателя, характеризующего теплотехническую эффективность конструкций, выше 1,0 м^2·°С/Вт, необходимо использование новых (и довольно дорогостоящих) технологических решений.

Специалистами НИИ строительной физики РААСН были разработаны предложения по повышению нормируемых теплотехнических показателей светопрозрачных конструкций для различных регионов РФ (табл.1 и 2, рис.1), обеспечивающих их окупаемость.

Таблица 1

Обязательные и рекомендуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче R в зависимости от климатического региона места строительства

	Обязательное минимальное требование [3]					
ГСОП	2 000	4 000	6 000	8 000	10 000	12 000
R (м^{2}К/Вт)	0,3	0,45	0,6	0,7	0,75	0,8
	Рекомендуемые значения					
ГСОП	До 4000		4000-6000	6000-8000	8000 и более	
R (м^{2}К/Вт)	0,60		0,75	0,80	0,90	
Климатическая зона для применения СПК (рис.1)	**1**		**2**	**3**	**4**	

Таблица 2

Теплопотери через окна (кВтч/м^2 в год) в различных климатических условиях

	R, (м^{2}К/Вт)	Градусо-сутки отопительного периода									
		1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	10 000	12 000
	0,3	80	160								
	0,35	69	137								
	0,4	60	120	180				Запрещены			
	0,45	53	107	160	213						
	0,5	48	96	144	192						
	0,55	44	87	131	175	218					
Рекомендуемые значения	**0,6**	40	80	120	160	200	240				
	0,65	37	74	111	148	185	222	258			
	0,7	34	69	103	137	171	206	240	274		
	0,75	32	64	96	128	160	192	224	256	320	
	0,8	30	60	90	120	150	180	210	240	300	360
	0,85	28	56	85	113	141	169	198	226	282	339
	0,9	27	53	80	107	133	160	187	213	267	320
	0,95	25	51	76	101	126	152	177	202	253	303
	1,0	24	48	72	96	120	144	168	192	240	288

Проведенные расчеты показывают, что дополнительные вложения в светопрозрачные конструкции с повышенными теплотехническими характеристиками окупаются в достаточно обозримые сроки, а оценка чистого дисконтированного дохода за срок службы окон доказывает выгодность применения энергоэффективных окон. Это дает нам право рекомендовать потребителям использовать окна с более высокими теплотехническими характеристиками, чем это предлагается действующими нормативными документами. На основе нашего опыта и проведенных расчетов мы рекомендуем использовать окна с более высоким сопротивлением теплопередаче (см. табл.1).

Быструю оценку величины экономии энергии при использовании различных светопрозрачных конструкций можно произвести с помощью табл. 2, составленной авторами на основании вышеизложенных материалов. В табл. 2 указаны рекомендуемые в зависимости от ГСОП характеристики светопрозрачных конструкций в различных регионах, а также показана область значений, запрещённых действующим СНиП «Тепловая защита зданий».

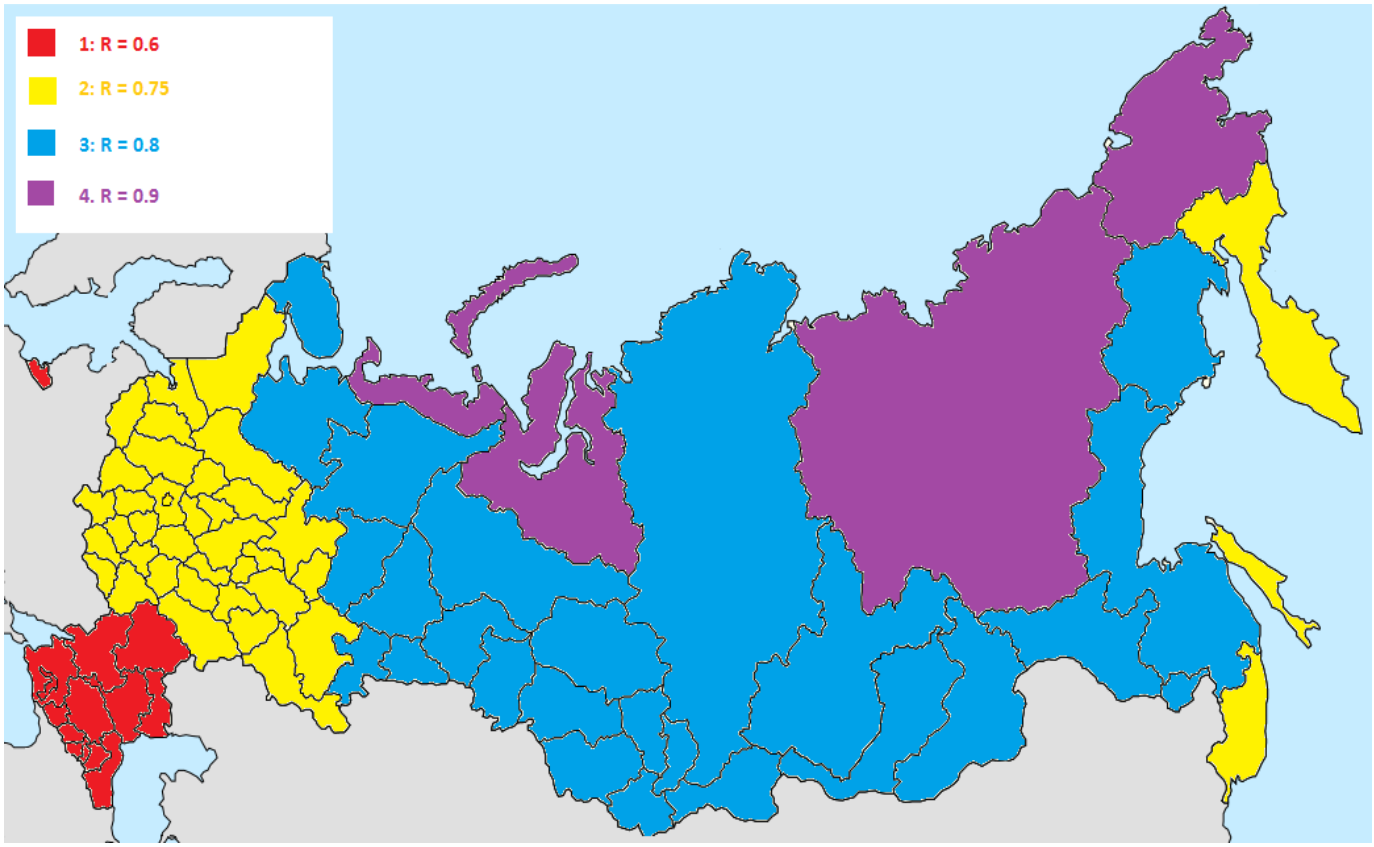


Рис.1. Условные климатические зоны территории РФ по рекомендуемым значениям приведенного сопротивления теплопередаче используемых светопрозрачных конструкций

На рис.1 приведена карта, где установлены условные климатические зоны территории РФ по рекомендуемым значениям используемых в том или ином регионе светопрозрачных конструкций.

При формировании карты мы стремились сохранить границы регионов и для этого учитывали плотность населения в некоторых из них, что является, конечно, некоторой «натяжкой». Например, очевидно, что климатические условия на севере и юге Красноярского края значительно отличаются. Однако в северной части этого региона плотность населения одна из самых низких в России (соответственно, и зданий меньше). При этом рекомендуемые значения (R=0,8 для Красноярского края) не

противоречат требованиям СНиП «Тепловая защита зданий» (лишь для мыса Челюскин на самом севере требуемое СНиП значение R=0,82 м^{2}К/Вт чуть выше, что, однако, вполне укладывается в допустимую для подобных оценок погрешность в 5%).

Предложения по использованию инновационных технических решений ограждающих и светопрозрачных конструкций [8-12]

Большинство современных мер, направленных на повышение теплотехнических характеристик окон, фасадов и ограждающих конструкций, необходимость которых вытекает из мировых тенденций на энергосбережение в строительной отрасли, относятся к «пассивным» методам, которые по многим оценкам являются в настоящее время экономически нецелесообразными.

В частности, по данным профессора В.Гагарина и Ассоциации навесных фасадных систем (АНФАС) для зданий выше трех этажей стоимость применения теплоизоляции толщиной больше 150 мм резко возрастает.

Именно поэтому в последние годы все большее внимание уделяется достаточно новой идеологии энергетической эффективности – технологиям «активного» энергосбережения. В целом к системам «активного» энергосбережения относятся технологии и конструкции, которые используют вторичные энергоресурсы, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, а также авторегулирование при изменении условий (как внешних, так и внутренних). К ним относятся следующие направления и их комбинации:

- механические приточно-вытяжные системы вентиляции с рекуперацией и утилизацией теплоты вентиляционных выбросов;
- авторегулируемая вытяжная вентиляция с механическим побуждением и естественным притоком через вентиляционные клапаны в окнах или наружных ограждающих конструкциях;
- теплонасосные системы теплоснабжения (отопления и горячего водоснабжения);
- системы, рекуперирующие и утилизирующие теплоту вентиляционных выбросов, канализационных стоков и др.;
- системы аккумулирования тепла и холода, в том числе и с использованием материалов с возможностью фазовых переходов;
- эффективные отопительные приборы с регулируемой теплоотдачей;
- системы автоматизированного учета потребления энергоресурсов и управления микроклиматом, обеспечивающих экономию энергии и снижение пиковых электрических нагрузок;
- системы, использующие солнечную, ветровую, геотермальную энергию и др.;
- энергоэффективные вентилируемые ограждающие конструкции с активной рекуперацией, выходящего теплового потока.

Одним из наиболее актуальных направлений развития энергосбережения в строительной отрасли – создание ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты. Производство таких изделий должно составлять основу строительной индустрии, а их применение позволит ускорить возведение объектов, снизить стоимость, повысить качество и долговечность зданий. Широкая номенклатура конструкций, выпускаемых отечественными предприятиями крупнопанельного домостроения, дает возможность проводить многовариантное проектирование, использовать в массовом строительстве конструкции с очень высокими потребительскими свойствами – надежностью, долговечностью, экологичностью, эстетичностью. То же относится и к массовому малоэтажному жилищному строительству, которое очень активно развивается в настоящее время в российских городах и других поселениях.

Энергоэффективные вентилируемые ограждающие конструкции, утилизируя уходящее тепло, возвращают его в помещение, обеспечивая постоянный комфортный воздухообмен, удобны в эксплуатации и являются перспективными для обеспечения энергосбережения с использованием вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии.

Некоторые варианты разработанных нами конструкций в рамках исследований, выполненных в НИИСФ в 2011-2014 годах, приведены на рис.2-5.

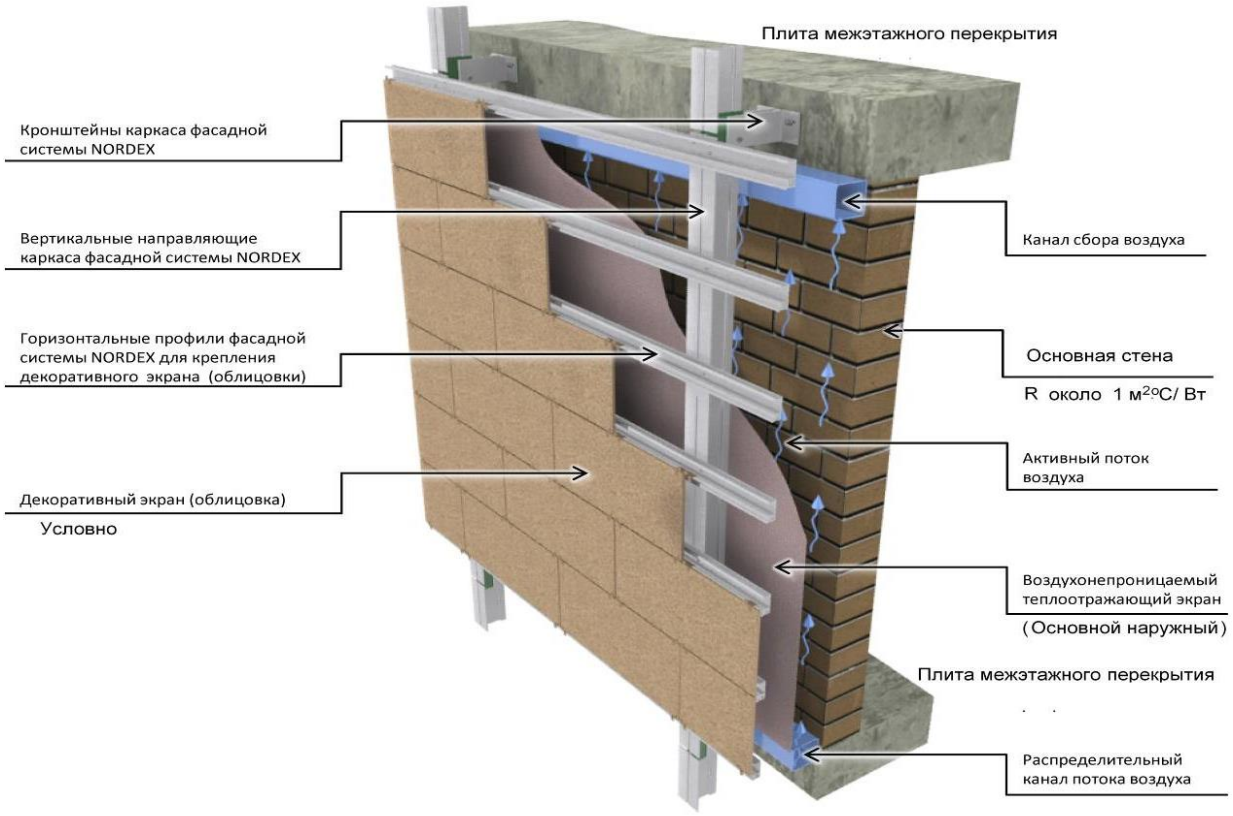


Рис. 2. Навесная фасадная система NORDEX с активным энергосбережением (вариант крепления в межэтажные перекрытия)

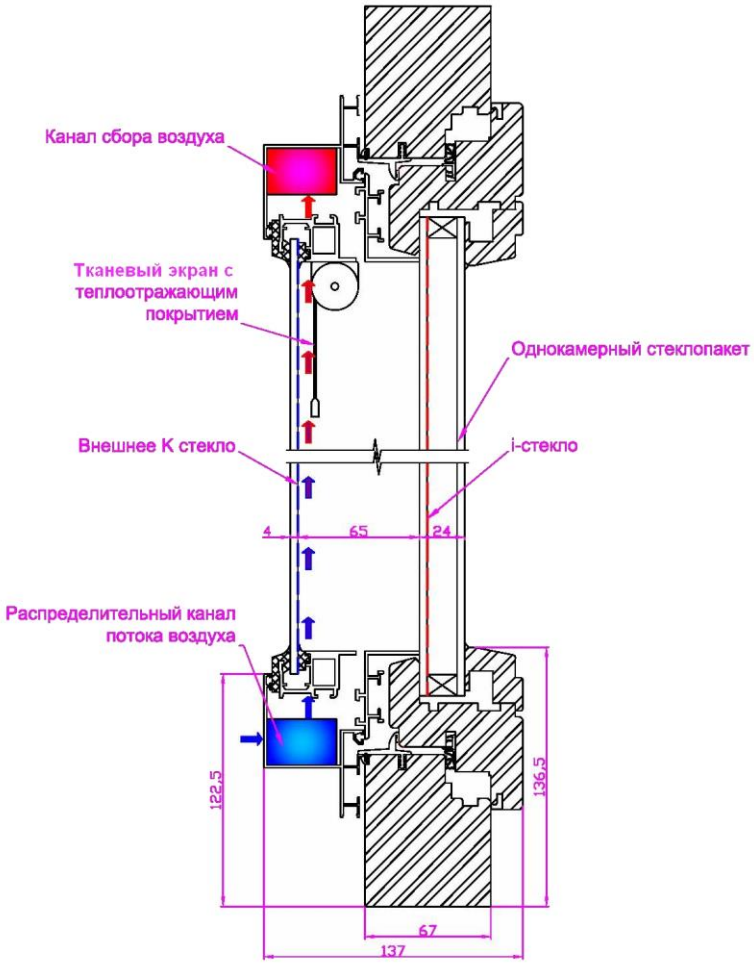


Рис. 3. Дерево-алюминиевый блок с активной рекуперацией выходящего теплового потока

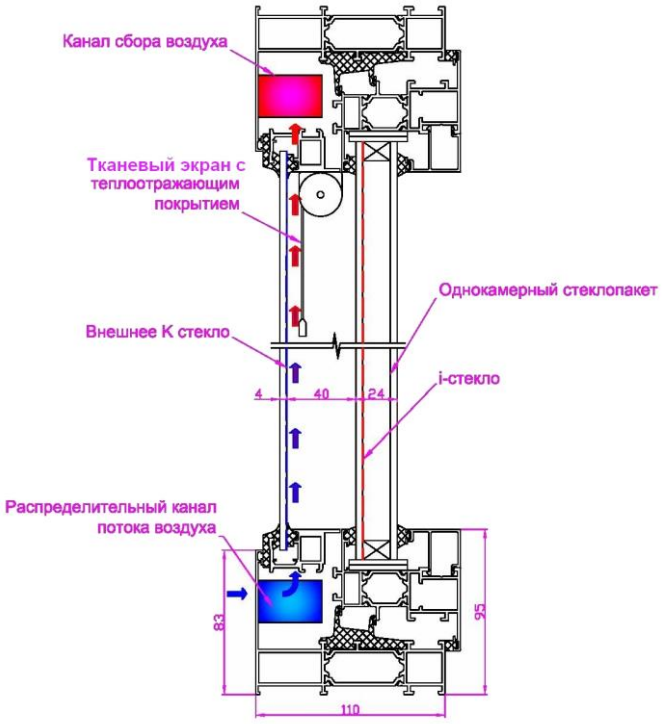


Рис. 4. Теплое алюминиевое окно с активной рекуперацией выходящего теплового потока

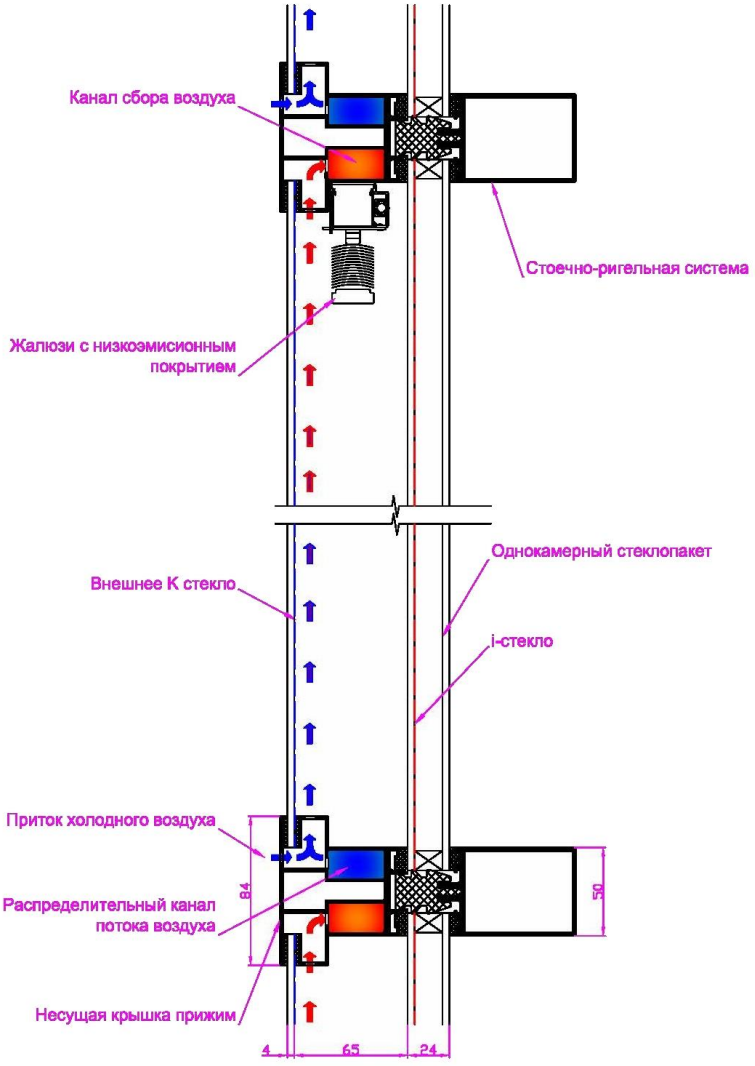


Рис.5. Стоечно-ригельная алюминиевая система с активной рекуперацией выходящего теплового потока

Применение конструкций, разработанных в НИИСФ РААСН с использованием технологий и систем активного энергосбережения, дает следующие основные преимущества:

- рекуперация выходящего теплового потока через ограждения с КПД выше 95%;
- рекуперация тепла вентиляционных выбросов с КПД выше 94%;
- рекуперация влаги: через ограждения с КПД 100%, а у вентвыбросов с КПД выше 84%;
- высокая энергоэффективность относительно существующих конструкций и норм 2020 г.;
- воздухообмен в 2-3 раза выше санитарных норм при экономичном воздушном потоке;
- отсутствуют процессы образования конденсата и «термошока»;
- улучшение и возможность регулирования внутри ЭВОК тепло-влажностного режима и теплотехнической однородности конструкции, повышение тепловой устойчивости ограждения;
- малая материалоёмкость, дешевизна экономичность, долговечность, эффективность, экологичность;
- возможность использования материалов с большей теплопроводностью;
- применение комбинации из существующих сертифицированных промышленных ограждающих конструкций;
- снижение требований к основной стене: теплотехнических (R=1), по качеству материала;
- повышение уровня комфортности микроклимата помещений с регулировкой защиты от внешних воздействий и теплохладоаккумуляцией энергии приточного воздуха в благоприятных условиях внешней среды в зимний, летний и переходный период;
- перспективы использования фотоэлектрических панелей, солнечной и ветровой энергии (приточные и вытяжные ветровые вентиляционные эжекторные дефлекторы повышенной энергоэффективности);
- сокращение отопительного периода.

Заключение

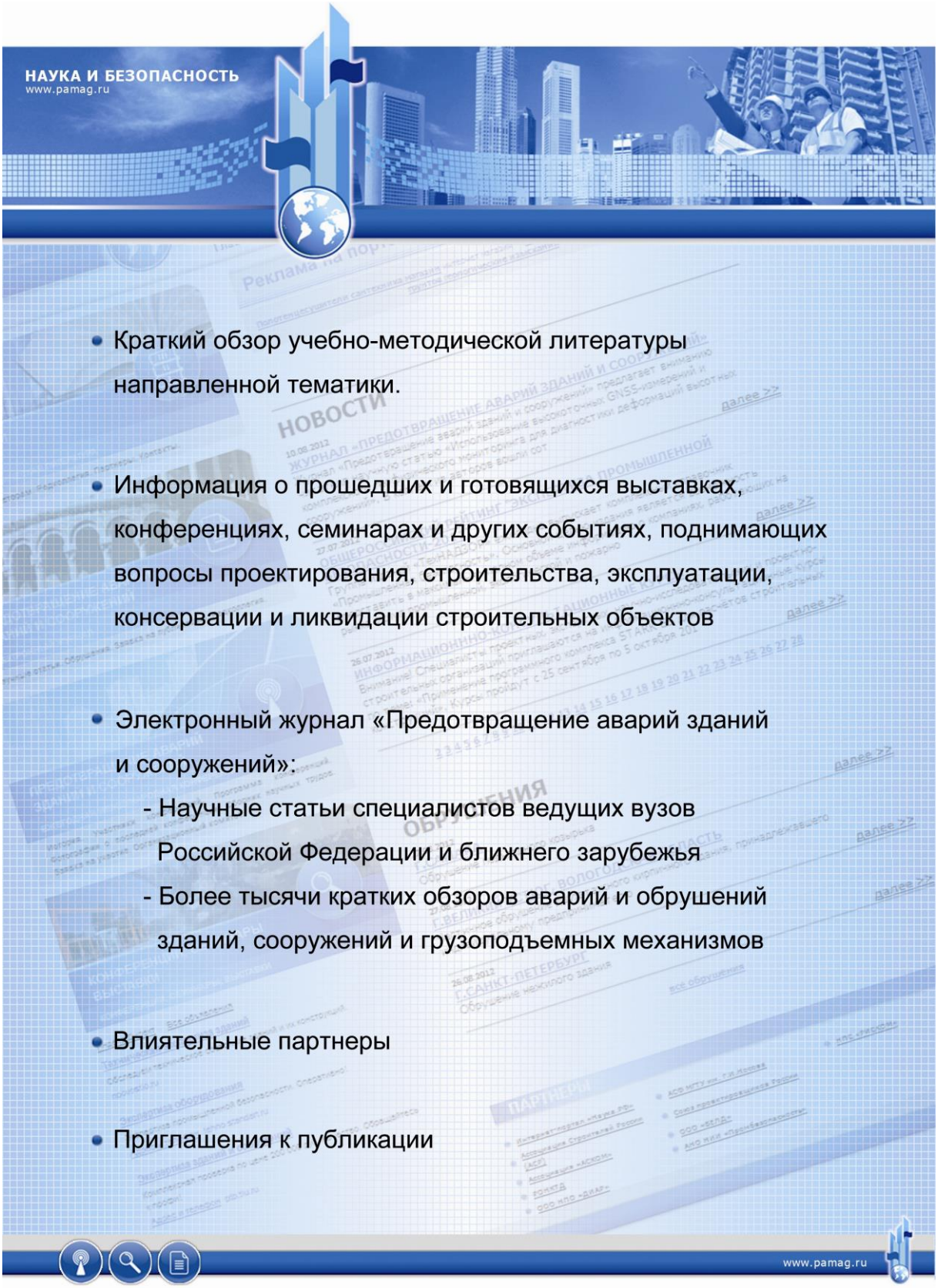
В настоящей статье:

- сформулированы основные задачи, которые должны быть решены при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений на территориях морских портов в различных регионах РФ;
- рассмотрена актуальная информация об энергосбережении и повышении энергетической эффективности в строительной отрасли РФ;
- предложены основные направления для разработки отраслевых и региональных Программ энергосбережения с учетом специфики зданий морских портов;
- даны предложения по использованию современных энергосберегающих светопрозрачных конструкций в различных климатических районах РФ;
- предложены инновационные технические решения ограждающих и светопрозрачных конструкций зданий и сооружений, обеспечивающих значительное снижение расходов топливно-энергетических ресурсов на их эксплуатацию.

Библиографический список

1. Шубин И.Л., Спиридонов А.В. Законодательство по энергосбережению в США, Европе и России. Пути решения // Вестник МГСУ. 2011. №3, Т.1. С. 4-14.
2. Спиридонов А., Шубин И. Энергосбережение в США, Европе и России – различие в подходах к реализации и экспертизе // СТРОЙПРОФИ. №3 и №4. С. 28-31.
3. Спиридонов А., Шубин И. Проблемы энергосбережения в российской строительной отрасли // Энергосбережение. 2013. №1, С. 15-21.
4. Спиридонов А., Шубин И., Осипов В. Современное состояние и перспективы развития светопрозрачных конструкций в России // Стекло и Керамика. 2013. №10. С. 33-40.
5. Спиридонов А. Выгодно ли устанавливать энергосберегающие окна? // Энергосбережение. 2013. №3. С. 62-67.
6. Абдурафиков Р., Спиридонов А. Как оценивать энергоэффективные окна // Энергосбережение. 2013. №7, с.68-75. №8, с.28-31.

7. Спиридонов А., Шубин И. Развитие светопрозрачных конструкций в России // Светотехника. 2014. №3. С.46-51.
8. Система активного энергосбережения с рекуперацией тепла / Т.Ахмяров, В.Беляев, А.Спиридонов, И.Шубин // Энергосбережение. 2013. №4. С. 36-46.
9. Ахмяров Т., Спиридонов А., Шубин И. Принципы проектирования и оценки наружных ограждающих конструкций с использованием современных технологий «активного» энергосбережения и рекуперации теплового потока // Жилищное строительство. 2014. №6. С. 8-13.
10. Ахмяров Т., Спиридонов А., Шубин И. Энергоэффективные вентилируемые ограждающие конструкции с активной рекуперацией выходящего теплового потока.// Жилищное Строительство. 2014. №10, С. 38-42.
11. Ахмяров Т., Спиридонов А., Шубин И. Светопрозрачные и фасадные конструкции с активной рекуперацией теплового потока // ЕвроСтройПрофи. 2014. №77. С.18-22.
12. Исследования эффективности вентилируемых ограждающих и светопрозрачных конструкций с активной рекуперацией выходящего теплового потока / Т.Ахмяров, В.Лобанов, А.Спиридонов, И.Шубин. Части 1-3. Электронный ресурс: http.www.tybet.ru, 18-20.02.2015.



- Краткий обзор учебно-методической литературы направленной тематики.
- Информация о прошедших и готовящихся выставках, конференциях, семинарах и других событиях, поднимающих вопросы проектирования, строительства, эксплуатации, консервации и ликвидации строительных объектов
- Электронный журнал «Предотвращение аварий зданий и сооружений»:
  - Научные статьи специалистов ведущих вузов Российской Федерации и ближнего зарубежья
  - Более тысячи кратких обзоров аварий и обрушений зданий, сооружений и грузоподъемных механизмов
- Влиятельные партнеры
- Приглашения к публикации

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭУ ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГОБЛОКА ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

УДК 629.039.58

Струев Вячеслав Петрович
Кудинович Игорь Владиславович
Кучин Николай Леонидович
Дульнев Андрей Иванович
Нестеров Александр Борисович
Рязанцева Ольга Владимировна
Шедько Сергей Владимирович
Шкляров Никита Вячеславович
Болгаров Сергей Петрович

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург
ОАО ЦКБ «Айсберг», г.Санкт-Петербург

АННОТАЦИЯ

В статье представлено краткое описание методик, разработанных в Крыловском государственном научном центре, для определения объема повреждений корпусных конструкций при навигационных авариях плавучих энергоблоков, расчета прочности поврежденного корпуса, оценки объема повреждений и ускорений при ударе корпуса о дно вследствие аварийного затопления, оценки ударостойкости и работоспособности оборудования атомной энергетической установки в условиях динамических нагрузок, моделирования развития пожара в помещениях плавучих энергоблоков, оценки радиационных последствий аварий при выходе радиоактивных продуктов в окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Плавучий энергоблок, Атомная энергетическая установка, Безопасность, Внешние воздействия

Проектируемые и строящиеся в настоящее время атомные суда должны удовлетворять как Правилам Российского Морского Регистра Судоходства [1, 2], так и нормативным требованиям и правилам ядерной и радиационной безопасности Ростехнадзора [3-5]. В соответствии с требованиями Регистра и Ростехнадзора при обосновании безопасности судов с атомной энергетической установкой (АЭУ) должны быть рассмотрены происшествия, связанные с внешними воздействиями на судно и пожарами на борту судна.

Плавучий энергоблок «Академик Ломоносов» [7] ((ПЭБ) пр. 20870), входящий в состав плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС), в соответствии с классификацией Российского морского регистра судоходства является стоечным судном и на него распространяются нормативные требования по ядерной и радиационной безопасности для судов с атомной энергетической установкой.

Основные характеристики и общее расположение ПЭБ представлено на (табл.1, рис.1).

Таблица 1

Основные характеристики ПЭБ проекта 20870

Характеристика	Значение
Водоизмещение	21 000 т
Длина	140 м
Ширина	30 м
Осадка	5,6

Состав энергетической установки ПЭБ, состоящей из двух автогамных эшелонов представлен в табл.2.

Таблица 2

Состав энергетической установки ПЭБ пр.20870

Реакторная установка КЛТ-40С	2х150 МВт
Паротурбинная установка ТК-35/38-3,4	2х35 МВт
Главные генераторы (синхронные)	2х35 Мвт (10,5 кВ, 50 Гц)
Комплекс по обращению с ядерным топливом и хранению ОТВС	3 бака выдержки + 4 емкости хранения
Вспомогательная энергетическая установка	
Резервные дизель-генераторы	4х936 кВт
Аварийные дизель-генераторы	4х200 кВт
Парогенератор низкого давления	2х10 т/ч
Опреснительная установка	2х120 т/сут
Вспомогательная котельная установка	1х10 т/ч

Проектом предусмотрена конструктивная компоновка ПЭБ с хранилищем отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС) и собственным комплексом средств, обеспечивающим выполнение перезарядок реакторов, хранение ОТВС, без привлечения специальных и плавучих технологических баз перезарядки в течение 12-летнего межремонтного периода.

В статье представлены результаты анализа ядерной и радиационной безопасности АЭУ плавучего энергоблока при внешних воздействиях.

Методология анализа аварийных ситуаций, вызванных внешними воздействиями, включает: формирование перечня исходных событий с оценкой вероятности их возникновения; определение первичных последствий на основе данных по масштабам разрушений корпусных конструкций и состоянию оборудования; определение вторичных последствий для АЭУ, выявление сценариев, приводящих к радиационным авариям, определение радиационных последствий; оценку уровня безопасности судна с позиций ядерной и радиационной безопасности при внешних воздействиях.

Исходные события

Перечень исходных событий, рассматриваемых при анализе безопасности АЭУ ПЭБ при внешних авариях, представлен в табл. 3.

При проектном обосновании безопасности атомных судов в соответствии с нормативными документами [3, 4] аварии АЭУ разделяются на проектные и запроектные. При проектных авариях должна быть обеспечена радиационная безопасность персонала и населения. К запроектным относятся аварии, для предотвращения опасного развития которых не предусмотрено соответствующих средств безопасности (предусмотрены только системы локализации тяжелых последствий аварий). В случае запроектной аварии защита персонала и населения, а также ликвидация последствий аварии с целью снижения воздействия радиационных факторов предусматривается за счет разработки и реализации плана специальных организационных мероприятий.

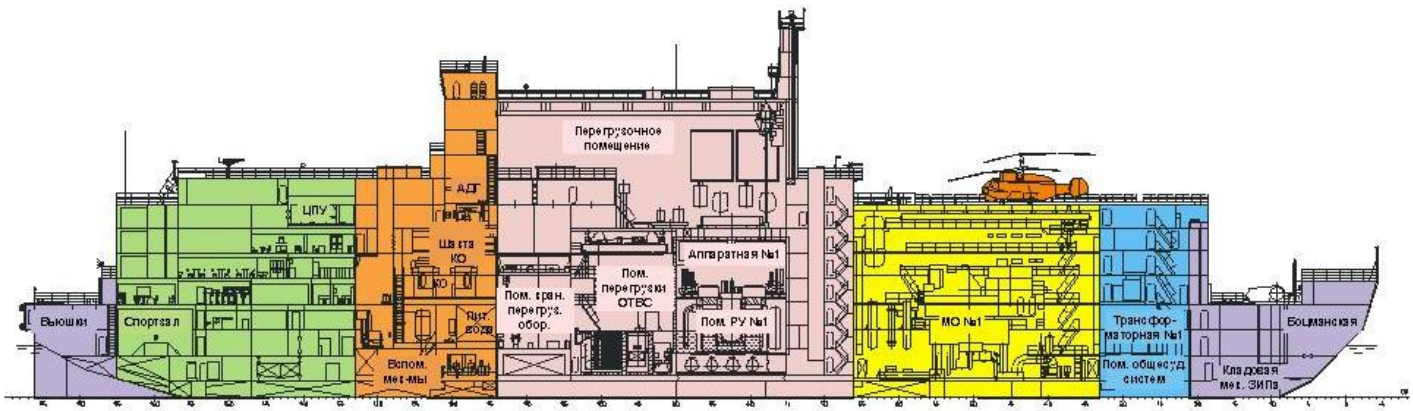


Рис. 1. ПЭБ пр. 20870

Таблица 3

Перечень внешних исходных событий для анализа безопасности АЭУ ПЭБ

Исходные события	Требования Правил РМРС [2]	Рекомендации НП-023-2000 [4]
Столкновение с другими судами	Столкновение	Ударные воздействия. Столкновения или посадки на мель. Столкновение с судном (пирсом) с поступлением воды в энергетические и вспомогательные отсеки
Посадка на мель. Посадка на мягкий грунт. Удар о подводный камень. Посадка на скалистую отмель	Посадка на мель Потеря маневренности	Посадка на мель. Потеря охлаждающей воды. Ударные воздействия столкновения или посадки на мель. Постоянное или периодическое прекращение подачи воды в результате посадки судна на мель (возможно с креном)
Затопление. Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде	Затопление на мелкой воде. Затопление на глубокой воде
Пожары в помещениях. Пожар в аппаратном помещении защитной оболочки (ЗО). Пожар за пределами ЗО	Пожар в защитном ограждении, в любом другом месте на судне	Пожар в центральном посту управления (ЦПУ) и энергетическом отсеке, в том числе в машинном отделении (МО), электротехническом отсеке, помещениях аппаратуры комплексной системы управления техническими средствами (КСУ ТС)
Взрывы. Взрыв баллонов в помещениях энергетической установки. Взрыв внешнего источника за пределами ПЭБ	Взрыв в любом месте на судне	Ударные волны, вызванные взрывами на борту судна
Падение вертолета Падение вертолета в районе реакторного отсека с высоты 50 м	Падение вертолета	Падение вертолета массой 10 т с высоты 50 м на помещения АЭУ, на корпусные конструкции судна, содержащие потенциально опасное оборудование, работающее под давлением, оборудование, заполненное водородом, кислородом, авиационным топливом
Сейсмическое воздействие		

В соответствии с нормативным документом [6] при анализе внешних воздействий на ядерно- и радиационно-опасные объекты допускается не учитывать в проектных основах процессы и факторы техногенного происхождения, для которых вероятность (частота) их реализации меньше 10^{-6} событий в год. При этом вероятность аварий, которые могут привести к тяжелому повреждению или расплавлению активной зоны не должна превышать 10^{-5} на реактор в год, а вероятность запроектных аварий с предельным выбросом радиоактивных веществ не должна превышать 10^{-7} на реактор в год

Таким образом, аварии, вызванные внешними исходными событиями воздействиями с вероятностью менее 10^{-6} событий в год, могут рассматриваться как запроектные.

Вероятность столкновения ПЭБ с другими судами оценивается на основе анализа статистических данных столкновений судов мирового флота. На основе анализа статистических данных по столкновениям судов мирового флота, включая районы интенсивного судоходства, вероятность получения судном пробоины составляет $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ событий в год. Указанное значение завышено для ПЭБ, так как не учитывает характер плавания по Се-

верному морскому пути с относительно слабым судоходством и то, что в месте базирования ПЭБ установлен в акватории ограниченной глубины и защищен гидротехническими сооружениями, что предотвращает несанкционированное приближение к нему судов и практически исключает возможность столкновения таранного типа. Навигационные аварии, связанные с тараном ПЭБ другим судном, в принципе, могут произойти на этапе буксировки ПЭБ. В соответствии с Правилами РМРС [2] конструктивная защита реакторного отсека атомного судна должна исключать проникновения таранящего судна, приводящие к повреждению защитного ограждения, при принятых проектом столкновениях. Используя понятие критической скорости – максимальной скорости таранящего судна, при которой разрушается конструктивная защита, а защитное ограждение и защитная оболочка реакторной установки остаются неповрежденными, можно выделить проектные и запроектные аварии, связанные со столкновениями. К проектным авариям относятся столкновения, при которых скорость таранящего судна меньше критической, а к запроектным – столкновения, при которых скорость таранящего судна превышает критическую.

Вероятность повреждения корпуса ПЭБ в районе реакторного отсека до ЗО (т.е. с нарушением целостности защитного ограждения) составляет $1{,}1\cdot10^{-7}$ год$^{-1}$, а в районе хранилищ глубиной до помещения хранилищ ОТВС и ТРО – $0{,}7\cdot10^{-7}$ год$^{-1}$, что позволяет отнести указанные аварии к запроектным.

Непотопляемость ПЭБ обеспечивается при затоплении любых двух смежных отсеков для всех спецификационных случаев нагрузки. Затопление ПЭБ в принципе возможно в результате тарана его другим судном под острым углом или при столкновении с подводным препятствием с образованием пробоины большой протяженности ниже ватерлинии. Вероятность такого события оценивается величиной $5\cdot10^{-7}$ год$^{-1}$, что позволяют отнести затопление ПЭБ в результате столкновения к запроектным авариям.

Затопление ПЭБ на мелкой воде в месте базирования возможно при взрыве на борту с повреждением корпуса ниже ватерлинии и распространении воды в соседние отсеки через поврежденные переборки. Вероятность взрыва на борту ПЭБ мала (менее 10^{-6} событий в год), поэтому затопление на мелкой воде в зоне базирования относится к запроектным авариям.

Раскрепление в месте базирования обеспечивает надежное удержание ПЭБ при экстремальных внешних воздействиях, поэтому посадка ПЭБ на мель в пункте базирования при обрыве швартовных штанг не рассматривается. Посадка на мель с большей вероятностью может произойти в период морской буксировки ПЭБ и рассматривается как проектная авария.

Газовые баллоны являются источниками потенциальной опасности возникновения взрыва, который приводит к разрушению корпусных конструкций и выходу из строя оборудования ПЭБ.

Вероятность взрыва газовых баллонов при пожаре определяется вероятностью несрабатывания предохранительного клапана. Предохранительные клапаны, установленные на газовых баллонах имеют вероятность безотказной работы P=0,98 в течении непрерывной работы T=5000ч [9]. Вероятность неоткрытия предохранительного клапана принимается равной 10^{-2} 1/треб. Отказ предохранительного клапана может проявиться в неоткрытии, преждевременном открытии, заклинивании в полностью или частично открытом положении. Вероятность неоткрытия предохранительных клапанов составляет $P_{неоткр}=10^{-5}$ 1/треб. Наиболее пожароопасным помещением ПЭБ является МО, где размещено 6 баллонов. Вероятность возникновения пожара в МО составляет $P_{пож}=4\cdot10^{-3}$ 1/год ,а вероятность взрыва баллонов в МО составляет $P_{взрыв}=2\cdot10^{-7}$ 1/год. Таким образом, взрыв газовых баллонов на борту ПЭБ относится к запроектным авариям.

К внешним источникам взрывной опасности для ПЭБ, относятся: объекты, связанные с хранением взрывчатых веществ и горюче-смазочных материалов. Дополнительно в качестве источника потенциальной опасности взрыва рассматривается танкер, который может эпизодически использоваться для доза-

правки ПЭБ дизельным топливом. Взрывы внешнего источника за пределами ПЭБ рассматриваются как проектные аварии.

При оценки безопасности ПЭБ при авиационных катастрофах использован апробированный для радиационно-опасных объектов подход, предусматривающий определение допустимых величин удаления границ воздушных трасс и маршрутов полетов летательных аппаратов военно-воздушных сил (ВВС), исходя из принятого в международной практике уровня вероятности (10^{-7} 1/год) пересечения границ внешнего контура ПЭБ падающим летательным аппаратом или его обломками.

При условии соблюдения указанных ограничений на полеты и учитывая, что в процессе строительства принято решение об исключении взлетно-посадочной площадки на ПЭБ, падение летательного аппарата на ПЭБ следует рассматривать как запроектную аварию.

Плавучий энергоблок входит в состав ПАТЭС, поэтому для него как для составной части атомной электростанции в перечень исходных событий включены сейсмические воздействия. В качестве возможных мест для размещения ПАТЭС рассматривались п. Певек (Республика Саха Якутия), г. Северодвинск, г. Вилючинск (Камчатка). Наиболее сейсмоопасной является площадка в районе г. Вилючинск, которая относится к 9-балльной зоне сейсмических сотрясений по шкале MSK-64. Данное сейсмическое воздействие рассматривается в качестве исходного события проектной аварийной ситуации.

Навигационные аварии

В качестве навигационных аварий рассматриваются: столкновение судов; удар днищем о подводный камень на волнении; посадка на мель.

При анализе аварийных ситуаций, связанных со столкновением, определяются: критическая скорость таранящего судна; возможные разрушения корпусных конструкций и помещений ПЭБ; максимальные величины ускорений при ударе; состояние АЭУ после столкновения.

В методиках определения объема повреждений судна при столкновениях и ударах используется условие равенства энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций и энергии удара. Энергия удара при столкновении судов определяется как разность кинетической энергии движении судов до и после столкновения с учетом присоединенных масс воды, поэтому полученные разрушения будут зависеть от скорости, водоизмещения и вида носовой оконечности таранящего судна. Предполагается, что удар полностью неупругий и вся энергия удара передается в разрушение корпусных конструкций аварийного судна. Расчет энергопоглощения корпусных конструкции выполняется по инженерной методике [10, 11], разработанной с использованием экспериментальных данных по разрушению полунатурных конструкций (рис.2). На основании зависимости энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций аварийного судна от глубины проникновения носа таранящего судна (рис.3) можно определить энергию удара и, соответственно, критическую скорость таранящего судна, а также оценить усилие взаимодействия и ускорение судна при столкновении.

В качестве таранящих судов рассматривались: ледокол пр. 22220, лихтеровоз «Севморпуть», арктический танкер типа «Василий Динков». Исходя из консервативного подхода, принимался самый неблагоприятный вариант столкновения – удар таранящего судна носовой оконечностью под прямым углом в борт ПЭБ в районе реакторного отсека.

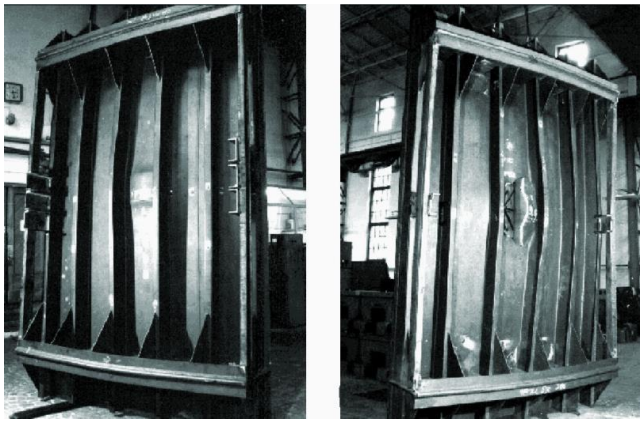


Рис. 2. Эксперимент по определению энергопоглощения корпусных конструкций судна

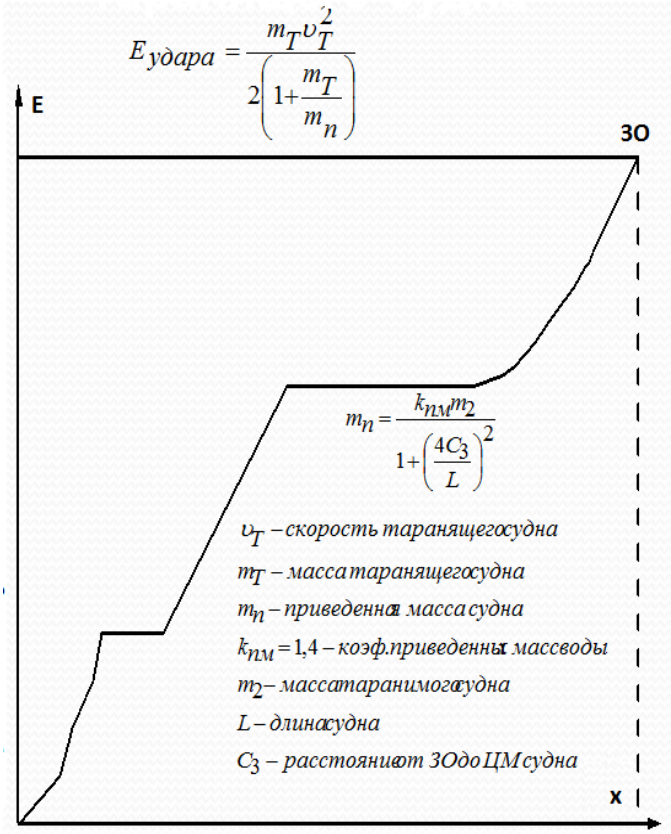


Рис. 3. Зависимость энергопоглощения деформации и разрушения корпусных конструкций (Е) от глубины внедрения таранящего судна (Х)

Результаты расчетов последствий тарана ПЭБ крупными арктическими судами показали следующее:

- Критическая скорость таранящего судна составляет 5-7 узлов, что превышает скорость маневрирования судов во льдах.
- В случае тарана с критической скоростью ускорения ПЭБ составляет 0,4g и не представляет опасности для механизмов и оборудования. Общая прочность ПЭБ при этом как от вертикального, так и от горизонтального изгиба не нарушается.
- Таран ПЭБ судном, скорость которого выше критической, приводит к разрушению конструктивной бортовой защиты ПЭБ и продольной переборки защитного ограждения. При буксировке ПЭБ обе реакторные установки (РУ) выведены из действия, в хранилищах ОТВС находятся шесть комплектов активных зон с различными сроками выдержки. Электроснабжение ПЭБ обеспечивается от резервных дизель-генераторов (РДГ).

В штормовых условиях волнения на мелководье возможен удар днищем о подводный камень или скалу, который приведет к повреждению корпусных конструкций. В случае удара ПЭБ о подводный камень (или скалу) конструкция днища и днищевой конструктивной защиты обеспечивает неповреждаемость ЗО при интенсивности волнения моря до 6 баллов (соответствует высоте волны 3-процентной обеспеченности 5,4 м).

При посадке на мягкий грунт судно не получает внешних повреждений, однако в период отлива возможно «обсыхание» (изменение осадки), что увеличивает нагрузку на корпус. Величина «обсыхания» корпуса при посадке судна на мель определяется прежде всего значением величины прилива – отлива. При посадке на мягкий грунт оборудование энергетической установки и систем остаются в работоспособном состоянии.

При посадке ПЭБ на скалистый грунт (отмель) возникают большие контактные усилия, приводящие к заметным местным разрушениям конструкции. В условиях существенного волнения моря (5-6 баллов) такие повреждения интенсивно нарастают и могут стать весьма значительными. Таким образом, если ПЭБ не будет снят с мели, возможно разрушение емкостей хранения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с выходом радиоактивности в забортную воду.

Затопление

Под затоплением на мелкой воде понимается потеря плавучести и погружение ПЭБ до верхней палубы (ВП) (глубина моря в месте затопления не более 10 метров). В этом случае ЗО остаются незатопленными, а помещения с оборудованием АЭУ, расположенные ниже ВП, затоплены водой. РУ выводятся из действия. Электроснабжение ПЭБ обеспечивается аварийными дизель-генераторами (АДГ), которые размещены на палубах надстройки 2,3 ярусов и не затапливаются. При поступлении забортной воды в отсеки, где размещается оборудование ЯЭУ, в первую очередь могут выйти из строя электронасосы, расположенные на втором дне

(главные конденсатные, питательные и циркуляционные насосы, конденсатный и циркуляционный насосы технологического конденсатора, насос 4 контура). В результате выходят из строя активные каналы системы аварийного расхолаживания (САР), расхолаживание РУ осуществляется пассивными каналами САР. Запас воды в цистернах аварийного расхолаживания (ЦАР) достаточен для работы пассивных каналов САР в течение 24 часов, что обеспечивает снижение давления и температуры теплоносителя 1 контура до значений, гарантирующих отсутствие разгерметизации первого контура. Учитывая, что при затоплении ПЭБ по верхнюю палубу остаются в работе АДГ, могут быть приняты меры для пополнения ЦАР водой и обеспечения более глубокого расхолаживания. По окончании подачи воды в ПГ в связи исчерпанием ее запасов в ЦАР и цистернах питательной воды отвод тепла от реакторов осуществляется рассеиванием при выпаривании запаса воды баков МВЗ. Рассматриваемая аварийная ситуация не приводит к радиационным последствиям.

При затоплении ПЭБ на глубокой воде вследствие поступления воды внутрь корпуса возникает дифферент (в зависимости от положения пробоины дифферент может быть как на нос, так и на корму). До глубины 400-600 м ПЭБ тонет вниз оконечностью с возрастающей скоростью, затем под действием гидродинамических сил происходит поворот корпуса в горизонтальное положение, вертикальная скорость погружения уменьшается и движение приобретает равномерный характер.

В процессе погружения ПЭБ давление в ЗО будет выравниваться с забортным за счет поступления забортной воды через систему затопления ЗО, что предотвращает ее разрушение под воздействием перепада внутреннего и внешнего давлений.

При ударе о грунт на глубинах до 200 м ЗО не повреждается. На глубинах до 1000 м при ударе о грунт возможно разрушение защитного ограждения, ЗО и разгерметизация 1 контура, что приведет к выходу продуктов деления из РУ и хранилищ ОТВС в забортное пространство.

Пожары

Пожарная безопасность обеспечивается при проектировании выполнением Правил РМРС. С учетом этих требований разработаны противопожарная конструктивная защита, система пожарной сигнализации и активные системы пожаротушения.

Анализ распространения пожаров выполняется с использованием программного комплекса Fire 3.0 [12] в котором создана электронная модель судна. Трехмерная модель ПЭБ (рис.4) и его отсеков содержит данные по геометрии помещений, ограждающим конструкциям (подволок, палуба, переборки), проемам, горючей нагрузке, системе вентиляции, средствам пожаротушения.

Методика анализа развития пожара позволяет на основе уравнений теплового баланса определять параметры пожара (среднеобъемные температуры газовоздушной среды и температуры всех ограждающих конструкций), времена распространения пожаров по помещениям, а также оценить работоспособность оборудования.

Условиями распространения пожара в смежные помещения приняты: повышение до 160°С температуры на поверхности ограждающей конструкций в смежном с аварийным помещении или до 200°С среднеобъемной температуры в аварийном помещении. Процесс пламенного горения прекращается при снижении среднеобъемной концентрации кислорода до 14% или при полном выгорании горючей нагрузки.

При анализе последствий аварийных ситуаций, вызванных пожарами, используется консервативный подход, при котором принимается, что оборудование выходит из строя в момент возникновения пожара в помещениях, где возник пожар; а в помещениях смежных с аварийным – при достижении среднеобъемной температурой значения 45°С.

Анализ результатов расчета показал, что пожар, возникший в любом из помещений энергетических отсеков ПЭБ, локализуется в пределах одной противопожарной зоны. В случае пожара вывод из действия и расхолаживание реакторных установок обеспечивается с учетом единичного отказа в системах безопасности.

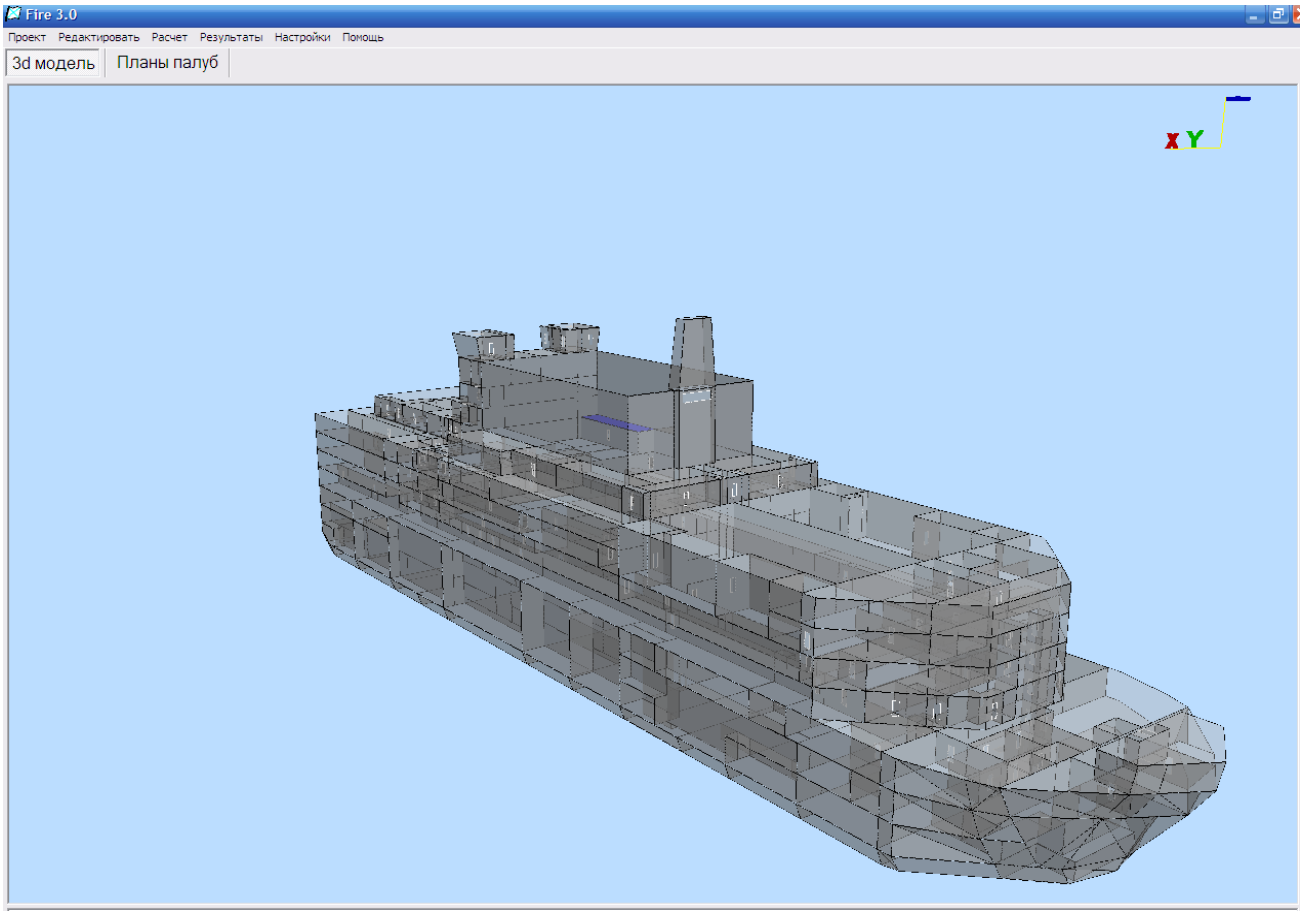


Рис. 4. Трехмерная модель ПЭБ

Взрывы на борту

В некоторых помещениях энергетической установки ПЭБ размещены баллоны с азотом и сжатым воздухом. Взрыв газовых баллонов возможен при повышении давления газа сверх предельно допустимого значения, например вследствие нагрева при пожаре, и отказе предохранительных клапанов. Поражающими факторами при взрывном разрушении сосудов высокого давления являются осколки. Определение параметров взрывного воздействия и зоны разрушения осуществлялось в соответствии с рекомендациями [13]. Анализ взрыва газовых баллонов показал, что худшим случаем является взрыв баллонов в машинном отделении. Взрыв баллонов, расположенных в МО, приводит к образованию пробоины в днище и повреждению водонепроницаемой главной противопожарной переборки (ГПП), в результате чего затапливается полностью 4 отсек и частично 5-й отсек. В результате взрыва выходит из строя оборудование паротурбинной установки, а обе РУ выводятся из действия и расхолаживаются без радиационных последствий.

Взрыв внешнего источника

Методика определение параметров воздушной ударной волны при взрыве взрывчатых веществ и горюче-смазочных материалов на берегу базируется на положениях Руководства [6], рекомендованного Ростехнадзором России к использованию при обосновании безопасности объектов ядерной энергетики.

В качестве критериев стойкости ПЭБ к внешним взрывам приняты значения избыточного давления на корпус ПЭБ, при которых обеспечивается прочность корпусных конструкций и системы раскрепления. Предельное значение избыточного давления, которое выдерживают корпусные конструкции ПЭБ, составляет 50 кПа. Предельная величина избыточного давления, при котором усилия в

штангах раскрепления ПЭБ не превышают допустимых значений, составляет 15 кПа.

Анализ полученных расчетных величин показал, что значение избыточного давления на корпус ПЭБ, создаваемое рассмотренными источниками аварийных взрывов в районе возможных площадок ПАТЭС, существенно ниже предельной величины давления 15 кПа. Таким образом, можно сделать вывод, что прочность корпуса и системы раскрепления ПЭБ при взрывах на берегу обеспечены. Оценка стойкости оборудования ПЭБ при сотрясениях, вызванных взрывами внешних источников на берегу показала, что эти взрывы не представляют опасности для АЭУ.

Оценка силового нагружения корпуса ПЭБ при взрыве паров топлива на танкере выполняется при следующих основных допущениях:

- взрыв происходит в танке, который полностью заполнен парами топлива;
- пары в танке сгорают (или детонируют) мгновенно во всем объеме;
- волновые процессы в газе не рассматриваются;
- палуба танкера под действием возникающего в танке давления отрывается по всей длине танка и движется вверх;
- сопротивление воздуха движению палубы танкера не учитывается;
- днищевое и бортовое перекрытия танка в процессе истечения газа считаются недеформируемыми.

В качестве критерия стойкости ПЭБ при взрыве на пришвартованном танкере принималось значение предельно-допустимого давления на корпус в районе реакторного отсека.

В результате взрыва на танкере будут частично разрушен борт ПЭБ. При разрушении корпусных конструкций продольная прочность ПЭБ обеспечивается, разрушение борта не распространяется дальше ГПП 66 и 114 шп., ЗО не повреждается. Ускорения корпуса ПЭБ в целом не превышают 0,13g.

В разрушенных помещениях ПЭБ отсутствует оборудование РУ. Однако в бортовых коридорах на 2 ярусе расположены кабельные трассы, выход из строя которых приведет к потере питания электропотребителей РУ. В этом случае электроснабжение потребителей РУ, включая потребителей систем безопасности, обеспечивается от резервных источников электропитания.

Анализ нагрузок, приходящих на оборудование РУ, с учетом спектра внешнего воздействия и собственных частот колебаний оборудования показал, что максимальные инерционные перегрузки оборудования РУ не превышают 1,4g. Ударостойкость оборудования АЭУ важного для безопасности при сотрясениях, вызванных взрывами на пришвартованном танкере обеспечивается.

Падение вертолета

Аварийная ситуация, связанная с падением вертолета на реакторный отсек, рассматривается для случая падения вертолетов Ка-32с с высоты 50 м, при этом скорость вертолета при ударе о преграду составляет около 31 м/с.

Ударное воздействие определялось при следующих предпосылках [8]: вертолет рассматривается как пластически разрушаемая в виде смятия тонкостенная оболочка с кусочно-линейным распределением по ее длине масс площадей поперечных и несущих сечений; корпусные конструкции судна полагаются жесткопластическими, деформирующимися как механизм после достижения предельной нагрузки вплоть до разрушения; удар происходит носовой частью фюзеляжа по нормали к конструкции. Для определения параметров силового нагружения преграды использовалась модифицированная схема Тейлора [14] (рис. 5).

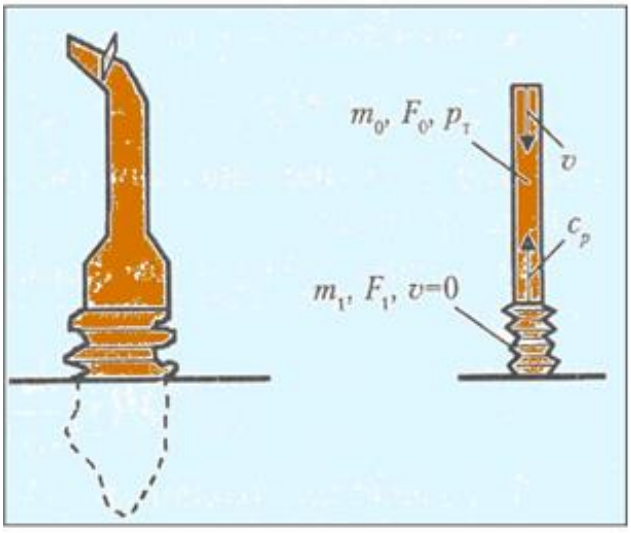


Рис. 5. Схема смятия фюзеляжа вертолета

В качестве основного параметра, характеризующего силовое нагружение конструкций при ударе вертолета, принимается «нагрузочная кривая» – зависимость нагрузки от времени при падении вертолета на жесткую преграду (рис. 6).

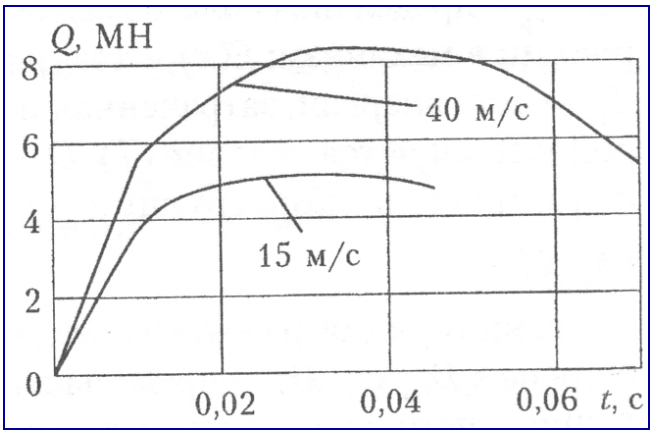


Рис. 6. Нагрузочная кривая падения вертолета

Расчет напряженно-дефрмированного состояния (НДС) корпусных конструкций ПЭБ проводился с использованием программы ANSYS (рис.7). Предполагается, что разрушение хотя бы одного из элементов конструкции (обшивки, ребер или шпангоутов) однозначно приводит к разрушению конструкции в целом.

Расчёт конструктивной защиты ПЭБ от падения летательного аппарата в районе РО, хранилища ОТВС и твердых радиоактивных отходов (ТРО), а также корпусных конструкций в районе МО показал, что при падении вертолёта типа Ка-32с с высоты 50м требуемый уровень прочности обеспечен: деформация элементов конструкций не превышают допустимых пределов. Возможность взрыва и пожара в помещениях АЭУ и хранилища ОТВС и ТРО вследствие проникновения авиационного топлива исключена.

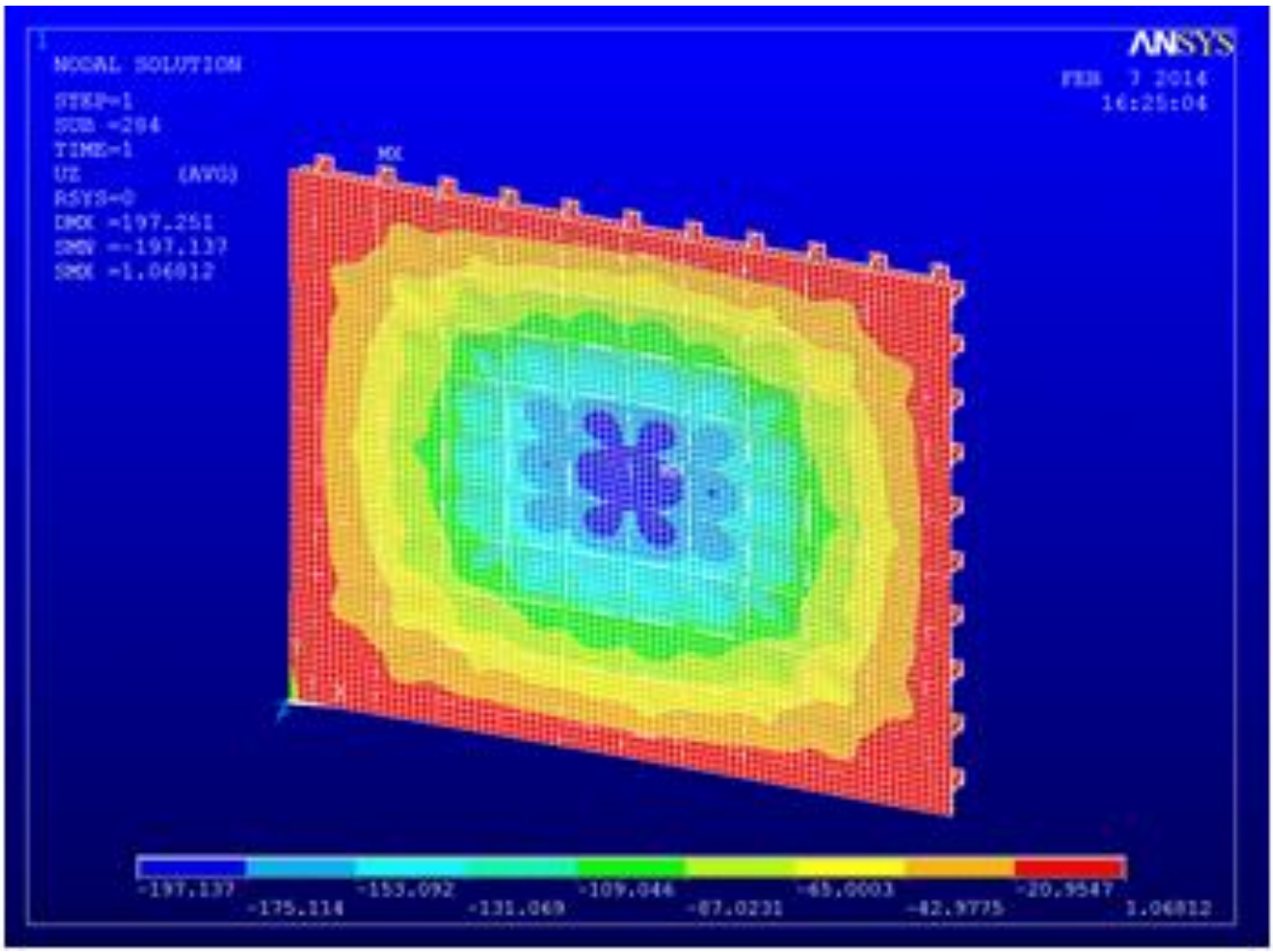


Рис. 7. НДС палубы судна при падении вертолета

Сейсмическое воздействие

В результате сопоставительного анализа прогнозируемых землетрясений выбраны характеристики землетрясения для оценки сейсмостойкости ПЭБ, размещаемого в районе г.Вилючинск. Вертикальные колебания донного грунта акватории при воздействии землетрясений передаются через слой воды на днище ПЭБ практически без изменения как по амплитудам, так и по частотному составу, то есть вертикальные сейсмические сотрясения корпуса ПЭБ соответствуют вертикальной составляющей сейсмических колебаний дна акватории в месте расположения ПЭБ. Влияние гидродинамических нагрузок, порождаемых горизонтальным движением берега, оградительных гидротехнических сооружений и дна акватории при землетрясении, для условий открытой акватории пренебрежимо мало.

Прочность конструкций корпуса ПЭБ при сейсмических воздействиях обеспечена.

Оценка радиационных последствий

Оценка радиационных последствий выполняется для тяжелых запроектных аварий, сопровождающихся разрушением всех защитных барьеров реакторной установки, а также повреждением защитного ограждения и защитной оболочки РУ.

Методика анализа радиационных последствий запроектных аварий атомных судов [15] включает следующие этапы.

- Определение интенсивности источника радиоактивного загрязнения на основе данных по состоянию помещений реакторного отсека, систем и оборудования АЭУ в результате аварии, накоплению радионуклидов в активной зоне и активности теплоносителя 1-го контура.
- Анализ переноса активности за пределами судна. В зависимости от состояния судна этот этап включает расчет выбросов и переноса радионуклидов в атмосфере или в морской среде.
- Определение радиационной обстановки и масштабов загрязнения окружающей среды. Этот этап включает расчет доз радиационного воздействия на население, обусловленного выбросами радионуклидов в окружающую среду. В случае затопления судна рассматриваются радиоэкологические последствия, которые учитывают воздействие радиационных факторов на флору и фауну и определяют скрытый характер воздействия на человека по пищевым цепочкам через морепродукты.

Масштаб воздействия аварийных выбросов на население и окружающую среду в значительной степени определяется процессами рассеяния радиоактивных примесей в атмосфере. Эти процессы зависят как от параметров выброса (длительность, высота), так и от направления и скорости ветра, состояния устойчивости атмосферы в момент выброса. Следуя консервативному подходу при оценке последствий, все аварийные выбросы принимаются по длительности кратковременными, это позволяет считать, что в период аварийного выброса не изменяются направление и скорость ветра, а также условия рассеяния примеси в атмосфере [16].

При оценке радиационных последствий запроектной аварии в случае затопления судна предполагается, что в забортное пространство происходит выброс всего теплоносителя первого контура, причём в морскую воду попадают все радионуклиды, содержащиеся в теплоносителе, за исключением радиоактивные благородные газы (РБГ), которые выходят в атмосферу. В дальнейшем происходит медленный процесс поступления в забортное пространство радионуклидов, находящихся в ядерном топливе. Радионуклиды, выходящие из ядерного топлива, перед поступлением в забортное пространство переносятся по цепочке последовательных объемов: первый контур, ЗО, реакторный отсек [17].

Проблема переноса радиоактивных нуклидов в морской воде от аварийного судна с АЭУ относится к задачам о нахождении поля примеси в морской среде. Пространственно-временное распределение примесей в океане (поле концентраций) определяется гидродинамическими факторами (перенос течением, турбулентная диффузия), физическими факторами (радиоактивный распад, адсорбция взвесью, переход в другое агрегатное состояние, например, коллоид – взвесь), биологическими факторами (накопление и перенос нук-

лидов живыми организмами) и химическими факторами. Наиболее значимые при тяжелой радиационной аварии ПЭБ радионуклиды, вышедшие из ядерного топлива. Поскольку длительное загрязнение океана при выходе продуктов деления из топливной композиции определяется, в основном, цезием-137 и стронцием-90, при рассмотрении переноса в морской среде продуктов деления, вышедших из поврежденной активной зоны, можно ограничиться учётом гидродинамических факторов.

Критериями оценки экологических последствий радиационных аварий на море являются масштабы зон акваторий, вовлеченных в послеаварийное загрязнение, концентрации наиболее биологически значимых радионуклидов в водных массах и донных отложениях, и как следствие этого, возможные уровни накопления радионуклидов в органах и тканях промысловых морских организмов и их кормовой базы. Эти показатели определяют уровни радиационного воздействия на население по прямым и непрямым путям, в частности, при поступлении радионуклидов с морской частью пищевых рационов.

Оценка радиационных последствий наиболее тяжелых запроектных аварий, сопровождающихся сбросом радиоактивных вод в морскую среду, выходом продуктов деления в атмосферу и морскую среду, позволяет сделать следующие выводы:

- время существования пятна загрязнения даже при условии слабого перемешивания не превосходит 1,5 суток. При условиях сильного перемешивания время существования пятна не превосходит 5 часов;
- максимальные радиус, площадь и объём пятна загрязнения при условии слабого перемешивания составляют 2,5 км, 13 км^2 и 0,2 км^3, а при условии интенсивного перемешивания 3,6 км, 40 км^2 и 0,8 км^3, соответственно;
- в случае направленного распространения загрязнений максимальный объём зоны загрязнения при слабом перемешивании не превышает 2,5 куб.км (при протяженности пятна менее 25 км и ширине около 8 км). При интенсивном перемешивании максимальный объём зоны загрязнения уменьшается до 0,08 куб.км (при протяженности пятна около 4 км и ширине менее 2 км);
- при равномерном распространении загрязнений максимальный объём зоны загрязнения при слабом перемешивании не превышает 0,4 куб.км (при радиусе пятна около 2,5 км). При интенсивном перемешивании максимальный объём зоны загрязнения уменьшается до 0,016 куб.км (при радиусе пятна 0,5 км);
- радионуклиды, выходящие из затопленного объекта, распространяются, в основном, в пределах придонного слоя моря, так как скорость обмена между слоями много меньше скорости рассеяния. Толщина придонного слоя, как правило, не превышает 50 м, поэтому при затоплении объекта на глубинах, превышающих 150 м, когда у дна появляется выраженный придонный слой, нет необходимости вводить ограничения на прохождение судов над местом затопления ПЭБ.

Выводы

1. Анализ происшествий, вызванных внешними воздействиями на ПЭБ, взрывами и пожарами на борту, показал в целом высокую степень безопасности ПЭБ.

Ядерная и радиационная безопасность ПЭБ обеспечена при всех проектных авариях:

- таран ПЭБ в район реакторного отсека другим судном, скорость которого меньше критической;
- посадка ПЭБ на мель (посадка на мягкий грунт, удар о подводный камень);
- взрывы на берегу в районе площадки ПАТЭС;
- взрыв на пришвартованном танкере;
- пожары в помещениях энергетической установки ПЭБ.

2. Прочность конструкций корпуса ПЭБ обеспечена при сейсмических воздействиях соответствующих МРЗ интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64. Ударостойкость оборудования ЯЭУ обеспечивает при МРЗ возможность вывода из действия и расхолаживания РУ без радиационных последствий.

3. В месте базирования ПЭБ, защищенном гидротехническими сооружениями, исключена возможность опасных навигационных аварий.

Навигационные аварии могут произойти при буксировке ПЭБ с выведенными из действия РУ.

Проектной навигационной аварией является таран ПЭБ другим судном имеющего критическую скорость, которая составляет 5-7 узлов в зависимости от носовой оконечности таранящего судна. В этом случае защитное ограждение ПЭБ не повреждается, общая прочность корпуса сохраняется ускорение ПЭБ не превышает 0.4g и не представляет опасности для механизмов и оборудования.

В случае удара ПЭБ днищем о подводный камень (скалу) конструктивная защита обеспечивает неповреждаемость защитного ограждения при волнении моря до 6 баллов.

В случае посадки ПЭБ на мягкий грунт при отливе общая прочность корпуса обеспечена при его «обсыхании» на величину до 1,4 м.

1. Взрывы внешних источников на берегу в районе возможных площадок размещения ПАТЭС не представляют опасности для ПЭБ. Прочность корпуса и системы раскрепления ПЭБ в этих случаях обеспечена. ЯЭУ остается в работоспособном состоянии и может работать без ограничения мощности. Хранилище ОТВС и ТРО остаются неповрежденным. Радиационных последствий нет.

2. Взрыв на пришвартованном танкере приводит к частичному разрушению борта ПЭБ выше ватерлинии. Оборудование РУ в зону разрушения не попадает. Возможно повреждение кабельных трасс одного борта, что приводит к ограничению мощности обеих РУ 50% $N_{ном}$. При необходимости РУ могут быть выведены из действия и расхоложены штатным образом. Хранилища ТВС и радиоактивных отходов остаются неповрежденными. Радиационных последствий нет.

3. Пожар, возникший в помещении энергетической установки, локализуются в пределах одной противопожарной зоны. В случае наиболее тяжелых пожаров РУ выводятся из действия и расхолаживаются без радиационных последствий.

4. Конструктивная защита ПЭБ от падения летательного аппарата в районе РО, хранилища ОТВС и ТРО, а также корпусные конструкции в районе МО обеспечивают требуемый уровень защищенности при падении вертолёта с высоты 50 м. Деформации элементов корпусных конструкций не превышают допустимых пределов, возможность взрыва в помещениях ЯЭУ и хранилище ОТВС и ТРО вследствие проникновения авиационного топлива исключена.

5. Взрыв газовых баллонов на борту ПЭБ вследствие малой вероятности относится к запроектным авариям. При взрывах газовых баллонов на борту ПЭБ защитные барьеры РУ не повреждаются, выходит из строя оборудование паротурбинной установки. Обе РУ выводятся из действия и расхолаживаются без радиационных последствий.

6. Затопление ПЭБ на мелкой воде в месте базирования возможно при взрыве на борту с повреждением корпуса ниже ватерлинии и распространении воды в соседние отсеки через поврежденные переборки. Вследствие малой вероятности данная авария относится к запроектным. При затоплении ПЭБ на мелкой воде расхолаживание РУ в течение 24 часов обеспечивается пассивными каналами САР, а затем отвод тепла от реакторов осуществляется рассеиванием при выпаривании запаса воды баков МВЗ.

7. Радиационные последствия в виде поступления ЖРО и теплоносителя первого контура в морскую среду возможны при следующих запроектных авариях в процессе транспортировки ПЭБ с выведенными из действия реакторами:

- таран ПЭБ в район реакторного отсека или хранилищ ОТВС и ТРО другим судном, скорость которого существенно больше критической;
- длительная посадка ПЭБ на скалистую отмель в штормовых условиях.

В случае запроектной аварии с затоплением ПЭБ на глубинах более 200 м при ударе о грунт возможно разрушение корпусных конструкций судна, хранилища ОТВС, защитного ограждения, ЗО, разгерметизация первого контура с последующим выходом продуктов деления из активных зон в морскую среду.

8. Мгновенный сброс радиоактивных вод из всех цистерн ЖРО и баков хранилищ ОТВС в морскую воду не представляет заметной экологической опасности вследствие непродолжительного существования пятна

загрязнения. Максимальный радиус загрязнения составляет 2,5 км. Время существования пятна загрязнения не превосходит 1,5 суток.

9. При затоплении ПЭБ на глубокой воде загрязнение моря вследствие выхода радиоактивных продуктов деления из активных зон имеет локальный характер.

В случае направленного распространения загрязнений протяженность пятна менее 25 км, а ширина около 8 км.

При затоплении ПЭБ на глубинах, превышающих 150 м, отсутствует необходимость вводить ограничения на прохождение судов над местом затопления.

Библиографический список

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. – С-Пб., 2014.
2. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. Российский морской регистр судоходства. – С-Пб., 2012.
3. НП-022-2000. Общие положения обеспечения безопасности ядерных энергетических установок судов. – М.: Госатомнадзор России, 2000.
4. НП-023-2000. Требования к отчету по обоснованию безопасности ядерных энергетических установок судов. – М.: Госатомнадзор России, 2000.
5. НП-029-01. Правила ядерной безопасности ядерных энергетических установок судов. – М.: Госатомнадзор России, 2001.
6. НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационные опасные объекты. – М.: Госатомнадзор России, 2005.
7. Шурочков М.В., Созонюк В.А. Плавучие атомные теплоэлектростанции: состояние и перспективы. «Перспективы развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». – М., 11-12 ноября 2010 г, с.187-192.
8. Дульнев А.И. Прочность и сотрясение судовых конструкций в условиях аварийного падения вертолета на палубу. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. 21(305), 2005 г.
9. ОСТ 5.5032-83. Клапаны предохранительные штуцерные сигнальные для воздухопроводов высокого давления. Технические условия.
10. Лепп Ю.Ф. Учет энергопоглощающей способности борта крупнотоннажных танкеров при столкновении. «Вопросы судостроения», серия: Проектирование судов. - Л., вып. 17, 1978.
11. Нестеров А.Б. Исследование эффективности конструктивной бортовой защиты при аварийном столкновении судов. «Вопросы судостроения», серия: Проектирование судов. - Л., вып. 40, 1984.
12. Шедько С.В. Компьютерное моделирование динамики развития корабельного пожара. «Труды Центрального научно-исследовательского института им. Акад. А.Н. Крылова». – С-Пб., вып. №54 (338), 2010. С. 91-99.
13. Взрывные явления. Оценка и последствия. В 2-х кн. / Пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е.Гельфанда. - М.: Мир, 1986.
14. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М.: Стройиздат, 1965.
15. Моделирование радиационного воздействия атомных объектов морской техники в проблеме безопасности морской седы и человека / М.Н. Ганул, Н.Л. Кучин, Ю.А. Платовских, И.В. Сергеев, В.П. Струев. – С-Пб.: СПбГУ, 2003.
16. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. – М.: МПА-98, 1998.
17. Ганул М.Н., Кучин Н.Л., Сергеев И.В. Моделирование источника загрязнения морской воды при затоплении судна, содержащего радиоактивные материалы. Атомная энергия. Т.98. вып.1, 2005. С.61-71.

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ АКВАТОРИИ, ОСТРОВОВ И ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

УДК 504.064 (985)

Струев Вячеслав Петрович — Начальник отделения – заместитель генерального директора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург, доктор физико-математических наук, профессор

Малышев Сергей Павлович — Начальник отдела научно-исследовательских разработок ЯРБ – главный конструктор ОКР по реабилитации арктических морей от ядреных и радиационно-опасных подводных объектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены первоочередные задачи для решения проблемы обеспечения экологической безопасности арктических акваторий Российской Федерации, озвученные в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации. Основное внимание в работе уделено проблеме экологической реабилитации акваторий от подводных потенциально опасных объектов, содержащие ядерные материалы и радиоактивные вещества. Проанализированы степень готовности отечественных технологий и статус работ, реализуемых в рамках государственных программ по направлению обеспечения экологической безопасности Арктической зоны. Предложено комплексное решение проблемы реабилитации на период до 2025 года с использованием технологии поиска, идентификации, подъема и передачи на утилизацию поднятых объектов. Решение проблемы обеспечения экологической безопасности арктических акваторий, островов и прибрежных территорий позволит ускорить процесс освоения и обустройства месторождений углеводородов на континентальном шельфе Карского и Баренцева морей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ядерно-опасный подводный объект, Радиационно-опасный подводный объект, Ядерная безопасность, Радиационная безопасность, Универсальное средство подъема, Комплексная технология

Введение

Одним из приоритетных направлений развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности является обеспечение экологической безопасности. Это обусловлено низкой устойчивостью экологических систем и их существенной зависимостью от незначительных техногенных и антропогенных воздействий.

Снижение уровней негативного техногенного и антропогенного воздействий на окружающую среду Арктики достигается в том числе за счет решения следующих задач:

- реализацией комплекса мероприятий по очистке арктических морей и территорий от загрязнений;
- повышением уровня экологической безопасности при осуществлении текущей хозяйственной и иной деятельности в Арктике в рамках государственных программ социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации.

Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, утвержденной Президентом Российской Федерации 08.02.2013 года, в числе первоочередных задач предусматривается «реализация мер по обеспечению экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации, включая приоритетные проекты по ликвидации экологических последствий прошлой хозяйственной и иной деятельности, а также по реабилитации арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных объектов».

Комплексная утилизация атомных подводных лодок

Одним из основных направлений реабилитации арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных объектов является реализация мероприятий по комплексной утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей и судов с ядерными энергетическими установками, судов атомно-технологического обслуживания.

С конца 80-х годов прошлого века в СССР, а затем с 1992 г. в России, начался процесс массового вывода из состава ВМФ атомных подводных лодок и судов атомно-технологического обслуживания. В результате в пунктах базирования флота, на акваториях судоремонтных заводов в Северо-Западном регионе накопилось значительное количество физически устаревших и изношенных атомных подводных лодок и плавучих блоков реакторных отсеков с отработавшим ядерным топливом в реакторах.

Федеральный орган исполнительной власти ответственный за организацию и проведение утилизации атомных подводных лодок и судов атомно-технологического обслуживания – Министерство обороны Российской Федерации, в лице Военно-Морского флота, не имел возможностей решить поставленную задачу. На плаву хранилось около 80 физически изношенных атомных подводных лодок и плавучих блоков реакторных отсеков с отработавшим ядреным топливом, что создавало угрозу глобальной экологической катастрофы на акваториях и прибрежных территориях Северо-Западного региона России.

В указанной ситуации, которая могла привести к экологической катастрофе и, как следствие, радиоактивному загрязнению акваторий и прибрежных территорий Северо-Западного региона, а также потере престижа атомной отрасли России, Министр Российской Федерации по атомной энергии Е.А Адамов добился выхода постановления Правительства Российской Федерации от 28.05.1998 г. № 518 «О мерах по ускорению утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками, выведенных из состава Военно-Морского флота, и экологической реабилитации радиационно-опасных объектов Военно-Морского флота».

Этим постановлением Правительства Российской Федерации Государственным заказчиком – координатором работ по утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками, выведенных из состава ВМФ, и экологической реабилитации радиационно-опасных объектов Военно-Морского флота было определено Министерство Российской Федерации по атомной энергии (рис. 1).

Рис. 1. Хранение на плаву в бухте Павловского (Приморский край) аварийной АПЛ «К-431»

Ускорению выхода этого постановления Правительства Российской Федерации способствовала деятельность группы ученых из Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук под руководством академика РАН, вице-адмирала в отставке А.А. Саркисова. Эта группа ученых способствовала развертыва-

нию широкомасштабного международного сотрудничества, обеспечившего выделение в рамках международной технической помощи значительных финансовых средств для строительства инфраструктуры (пунктов длительного хранения на плаву плавучих блоков реакторных отсеков, береговых пунктов долговременного хранения одноотсечных блоков реакторных отсеков, береговых баз выгрузки отработавшего ядерного топлива и т.д.), ускорению темпов утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомно-технологического обслуживания, выгрузке отработавшего ядерного топлива из реакторов, модернизации производственной базы отечественных заводов судостроительной промышленности, закупки высокопроизводительного оборудования и т.д.

На 1 июля 2014 года в Северо-Западном регионе выполнен значительный объем работ по комплексной утилизации атомных подводных лодок:

- подготовлены к долговременному хранению и поставлены на хранение в пункт долговременного хранения реакторных отсеков «Сайда» – 71 одноотсечный блок реакторных отсеков, что составляет 70% от общего количества атомных подводных лодок, выведенных из эксплуатации (рис. 2);
- на плаву в пункте временного хранения «Сайда» в ожидании конверсии в одноотсечный блок реакторного отсека хранится – 30 плавучих блоков реакторных отсеков утилизированных атомных подводных лодок;
- на стапеле в пункт долговременного хранения реакторных отсеков «Сайда» хранится в ожидании конверсии в одноотсечный блок реакторного отсека – 3 плавучих блока реакторных отсеков;
- практически завершены все работы по утилизации атомных подводных лодок с реакторными установками с жидкометаллическим теплоносителем, за исключением атомной подводной лодки «К-27», затопленной в 1981 году в заливе Степового на восточном побережье архипелага Новая земля (рис. 3).

В целом крупномасштабная программа комплексной утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей и судов с ядерными энергетическими установками, судов атомно-технологического обслуживания и экологической реабилитации радиационно опасных объектов Военно-Морского флота-благодаря интенсивной работе предприятий и организаций Государственной корпорации «Росатом», предприятий ОАО «Объединенная судостроительная корпорация», а также ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и ОАО «Центр технологий судостроения и судоремонта» в значительной степени завершена.

Рис. 2. Долговременное хранение одноотсечных блоков реакторных отсеков в Сайда-Губе

Рис. 3. Выгрузка реактора с ЖМТ из реакторного отсека атомной подводной лодки «К-64» в сухом доке СД-10 филиал Гремиха СЗЦ «СевРАО»

Реабилитация арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов

Другим, и может быть даже более технически сложным, направлением реабилитации арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных объектов является реабилитация арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов. Выполнение этих работ требует комплексной технологии и технических средств поиска, идентификации, комплексного инженерно-радиационного обследования, подъема, морской транспортировки поднятого объекта в составе транспортной системы «универсальное средство подъема-поднятый объект» на акваторию предприятия, постановку объекта в передаточный док и вытяжку его на открытую стапельную плиту или в эллинг для приведения объекта в ядерно- и радиационно-безопасное состояние и последующей комплексной утилизации.

Учитывая тот факт, что для реализации программы комплексной утилизации атомных подводных лодок, была создана мощная производственная база, разработаны технологические процессы и транспортно-технологические системы, которые в полной мере могут быть использованы при обращении с поднятыми ядерно- и радиационно-опасными подводными объектами, использование этой инфраструктуры на всех этапах обращения с указанными объектами значительно сократит финансовые затраты.

При этом, учитывая завершение основных объемов работ по комплексной утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомно-технологического обслуживания возможно обеспечить минимальный срок перехода к началу реализации программы реабилитации арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов с сохранением существующего кадрового потенциала, опыта и производственной базы.

Развернувшаяся с середины 40-х годов прошлого века гонка ядерных вооружений и последующее, с середины 50-х годов, интенсивное строительство боевых кораблей с ядерными энергетическими установками привело к накоплению большого количества техногенных радиоактивных веществ в виде твердых и жидких радиоактивных отходов. Возникла острая проблема их захоронения и начались поиски путей ее решения.

В зарубежных странах, а позднее в СССР был принят способ захоронения твердых радиоактивных отходов низкой удельной активности в морях Мирового океана. Эта процедура, как наименее дорогостоящая, стала общепринятой для стран развивающих военное и мирное использование атомной энергии.

Всего до начала 90-х годов 12-ю зарубежными странами в 47 районах Тихого и Атлантического океанов было затоплено около 46 ПБк твердых радиоактивных отходов, без учета вклада СССР. За указанный период в арктических морях СССР и Россией были захоронены по различным оценкам от 16 до 26 ПБк твердых радиоактивных отходов военного и гражданского атомных флотов. В целом вклад СССР/России в морские захоронения твердых радиоактивных отходов составляет около 50% активности, затопленных всеми зарубежными странами. При этом 95% из них приходится на северо-западную часть Арктики – Карское море.

С 1993 года практика захоронения любых радиоактивных отходов в морях Мирового океана была прекращена.

В настоящее время Россия приступила к реализации широкомасштабных проектов разведки и освоения месторождений углеводородов на континентальном шельфе арктических морей. Особое место среди арктических морей занимает Карское море, которое по объемам перспективных и прогнозных ресурсов углеводородов опережает все остальные моря континентального шельфа России.

В указанной ситуации, одной из первоочередных задач для решения проблемы скорейшего освоения и обустройства месторождений углеводородов на континентальном шельфе Карского моря, становится задача экологической реабилитации его акватории от подводных потенциально опасных объектов, содержащих ядерные материалы и ра-

диоактивные вещества – ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов, которые создают угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций.

Проекты по экологической реабилитации должны быть реализованы заблаговременно до начала детальной разведки и промышленного освоения участков месторождений углеводородов на континентальном шельфе Карского моря, в структуре которых значительный объем работ связан с операциями, выполняемыми на дне акваторий под водой.

Всего на дне Карского моря находятся следующие ядерно- и радиационно-опасные подводные объекты:

- две атомные подводные лодки с отработавшим ядерным топливом («К-27», «Б-159»);
- два реакторных отсека атомных подводных лодок с отработавшим ядерным топливом;
- понтон с ядерным реактором с отработавшим ядерным топливом атомной подводной лодки «К-140»;
- понтон с контейнером экранной сборки с отработавшим ядерным топливом реактора №2 а/л «Ленин»;
- два реакторных отсека атомных подводных лодок;
- реакторный отсек с установкой ОК-150 а/л «Ленин»;
- 19 судов с твердыми радиоактивными отходами;
- 735 элементов ядерных энергетических установок;
- более 17 тысяч контейнеров с радиоактивными отходами.

Учитывая весь комплекс проблем, связанный с освоением месторождений углеводородов на континентальном шельфе арктических морей и перспективами использованием их ресурсной базы в будущем, «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», утвержденная Президентом Российской Федерации 8 февраля 2013 г., предусматривает первоочередную реализация приоритетных проектов по реабилитации арктических морей от ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов.

К настоящему времени ФГУП «Крыловский государственный научный центр» выполнил и реализует ряд ОКР по разработке комплексной технологии и технических средств поиска, идентификации, подъема, транспортировки и передачи на утилизацию ядерно- и радиационно-опасных подводных объектов.

По результатам ранжирования, выполненного ИБРАЭ РАН и НИЦ «Курчатовский институт», разработаны предварительные рекомендации по обращению с ядерно- и радиационно-опасными объектами по трем вариантам (подъем, изоляция на дне или оставление на дне без вмешательства):

I группа – объекты с отработавшим ядерным топливом (ядерно-опасные подводные объекты):

1) Атомная подводная лодка «К-27», зав. № 601, проект 645 (подъем – 1-я очередь).

2) Баржа (понтон) с реактором атомной подводной лодки «К-140», зав. № 421, проект 667А (подъем – 1-я очередь, в месте затопления не обнаружена, требуется поиск силами ВМФ России).

3) Атомная подводная лодка «Б-159» («К-159»), зав. № 289, проект 627А (подъем – 1-я очередь).

4) Баржа (понтон) с экранной сборкой реактора № 2 реакторной установки ОК-150 атомного ледокола «Ленин», зав. № 701, проект 92 (подъем – 1-я очередь).

5) Реакторный отсек атомной подводной лодки «К-11», зав. № 285, проект 627А (подъем – 1-я очередь).

6) Реакторный отсек атомной подводной лодки «К-19», зав. № 901, проект 658 (подъем – 1-я очередь).

7) Атомная подводная лодка «К-278» (с 31.01.1989 г. – «Комсомолец»), зав. №510, проект 685 (не решен вопрос о способе реабилитации – подъем или окончательное захоронение на месте, последнее также может быть осуществлено с использованием универсального средства подъема проекта 23570).

Примечание: по I-й группе объектов очередность подъема рекомендуется в порядке соответствующем порядковым номерам в группе.

II группа – объекты без отработавшего ядерного топлива (радиационно-опасные подводные объекты):

1) Реакторный отсек атомной подводной лодки «К-3» (с 09,10,1962 г. – «Ленинский комсомол»), зав. № 254, проект 627 (подъем – 2-я очередь).

2) Реакторный отсек атомной подводной лодки «К-5», зав. № 260, проект 627А (подъем – 2-я очередь).

3) Реакторный отсек атомного ледокола «Ленин», зав. № 701, проект 92 с реакторной установкой ОК-150 (подъем – 2-я очередь).

4) Судно «Лихтер – 4» с двумя корпусами реакторов атомной подводной лодки «К-22», зав. № 538, проект 675 (подъем – 2-я очередь).

Примечание: по II-й группе объектов очередность подъема рекомендуется в порядке соответствующем порядковым номерам в группе.

III группа – объекты с твердыми радиоактивными отходами, затопленными в судах в Ново-Земельской впадине (радиационно-опасные подводные объекты):

1) Пароход «ХозеДиас», построен 16.11.1921 г. в г. Рендсбурге на верфи «Нобискруг» (бывший «Эльба»), взят Англией в 1945 г. (бывший «ЭмпайрКонфедерейшн»), 06.02.1946 г. передан по репарации СССР – Северное морское пароходство, г. Архангельск, списан 11.04.1966 г.

2) Теплоход «Саяны» (танкер), построен в 1954 г. в г. Турку на верфи «Валмет-Пансио», Минморфлот – Минрыбхоз (г. Мурманск), передан ВМФ в 60-х годах прошлого века.

3) Теплоход «Курейка» (рыболовный траулер), построен в 1955 г. в г. Гетеборг на верфи «ЛиндхольменВарв», порт приписки г. Мурманск, списан 25.12.1972 г.

4) Сторожевой корабль «Леопард», зав. № С-108, проект 50, сдан в состав ВМФ 30.04.1954 г., исключен из состава ВМФ (Северный Флот) 03.09.1981 г.

5) Пароход «Могилев» (лесовоз), построен в 1952 г. в г. Турку на верфи «Крейтон-Вулкан»,Северное морское пароходство (г. Архангельск), списан 10.12.1977 г.

Примечание: Необходимо решить вопрос о допустимости оставления каждого конкретного объекта на дне в процессе освоения месторождений углеводородов на участках Ново-Земельской впадины Карского моря, в случае недопустимости – приоритет по ранжированию в рамках реабилитации возрастает.

IV группа – 735 объектов в виде конструкций и элементов оборудования реакторных установок, затопленные без герметичной упаковки (радиационно-опасные подводные объекты массой до 8-10 т).

Через 3-5 лет после затопления произошла естественная дезактивация поверхностей этих объектов, а через 70-100 лет их активность снизится до минимального уровня за счет естественного распада. Подъем объектов этой группы нецелесообразен. Подъем этих объектов целесообразен в том случае, если объект находится в непосредственной близости от устья скважин или на площадке посадки стационарной или погружной платформы.

V группа – 17 500 объектов в виде контейнеров с твердыми радиоактивными отходами низкой удельной активности (радиационно-опасные подводные объекты массой до 0,5-1,0 т для контейнеров с неомоноличенными ТРО (около 16 500 контейнеров) и массой от 1 до 3 т для контейнеров залитых бетоном или битумом.

Практически все 16 500 контейнеров из числа объектов V группы с неомоноличенными ТРО из-за коррозии обшивки (1,5-2,0 мм) разрушились и основная масса радиоактивных веществ в 1995-2010 гг., не причинив вреда ни окружающей среде, ни проживающему вблизи населению, поступила в морскую среду. По последним оценкам около 1000 контейнеров с ТРО, залитых бетоном и битумом также входящих в V группу, до 2150-2250 гг. еще будут оставаться локальными источниками радиоактивного загрязнения морской среды. Интенсивность поступления радиоактивных нуклидов в морскую среду для каждого из них невелика – примерно 0,1-10,0 МБк в год.

В результате их подъем нецелесообразен, так как даже совокупный источник из 1000 контейнеров не превышает 0,01% допустимой нормы.

В рамках ОКР «Разработка технического предложения по комплексной технологии по-

иска, идентификации, подъема, транспортировки и передачи на утилизацию ядерных и радиационно опасных подводных объектов» разработана комплексная технология для реализации программы реабилитации арктических морей от этих объектов, включающая:

- технологию проведения до поиска, идентификации и регистрации в установленном порядке объектов;
- технологию проведения комплексного инженерно-радиационного обследования объектов (без проведения КИРО по индивидуальной для каждого объекта программе разработка и реализация всех остальных этапов комплексной технологии не возможна);
- технологию подъема ядерно- и радиационно-опасных объектов, которая реализуется в проекте подъема конкретного объекта;
- технологию морской транспортировки объекта в составе транспортной системы «универсальное средство подъема-поднятый объект» на акваторию судоремонтного завода;
- технологию постановки поднятого объекта в существующий передаточный плавдок и вытяжки его с существующим технологическим оборудованием на стапель или в эллинг судоремонтного завода.

Завершает данный этап процедура передачи на утилизацию поднятого объекта, включая в случае необходимости выгрузку отработавшего ядерного топлива, Госкорпорации «Росатом» и исполнителю работ по утилизации в соответствии с основными положениями постановления Правительства Российской Федерации от 28.05.1998 г. №518 «О мерах по ускорению утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками, выведенных из состава Военно-Морского флота, и экологической реабилитации радиационно-опасных объектов Военно-Морского флота» и Концепции комплексной утилизации атомных подводных лодок, одобренной Правительством Российской Федерации для использования в работе всеми предприятиями-участниками комплексной утилизации атомных подводных лодок.

Центральным звеном комплексной технологии является универсальное средство подъема проекта 23570, которое представляет из себя многофункциональную несамоходную подъемно-транспортную баржу-площадку катамаранного типа с ледовыми усилениями Arc4, проектируемую по Правилам ФАУ «Российский морской регистр судоходства». По состоянию на начало 2015 года эскизный проект универсального средства подъема получил положительные заключения ФАУ «РМРС».

Универсальное средство подъема оборудовано грузоподъемными устройствами группового действия:

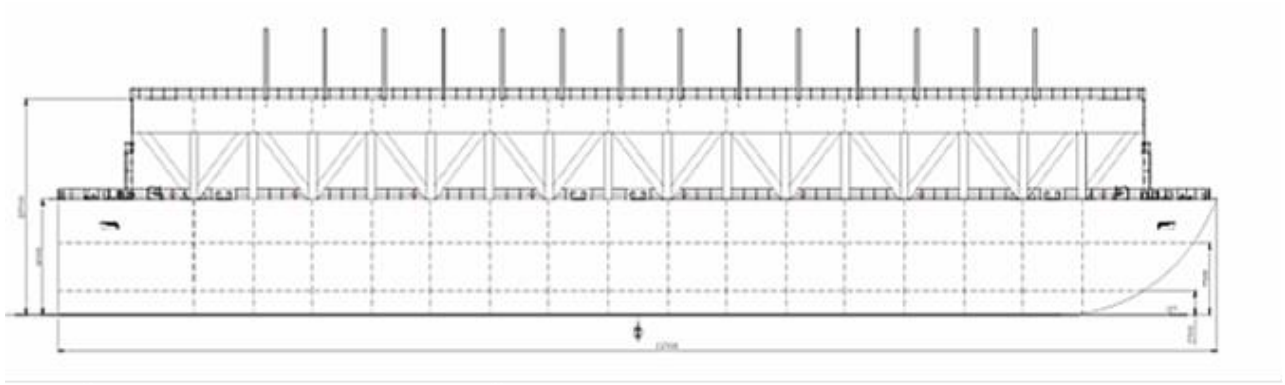
- грузоподъемное устройство г/п 7000 тс в составе 28 подъемников г/п 250 т;
- грузоподъемное устройство г/п 9800 т. в составе 28 подъемников г/п 350 т;
- грузоподъемный комплекс г/п 16800 т в составе 28 подъемников г/п 250 т и 28 подъемников г/п 350 т.

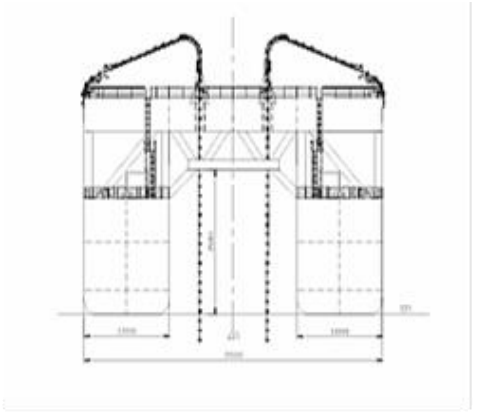
Общий вид универсального средства подъема приведен на рис. 4.

Универсальное средство подъема проекта 23570 является основным объектом многофункционального судоподъемного комплекса проекта 23570 СПК в составе:

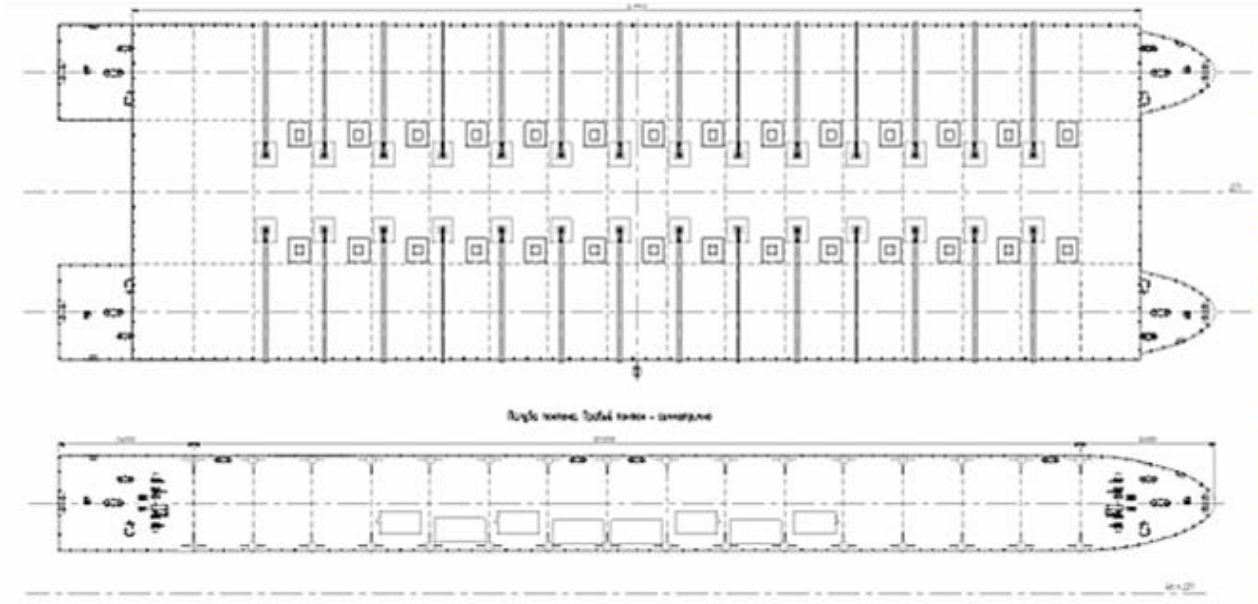
- несамоходная подъемно-транспортная баржа-площадка катамаранного типа проекта 23570 – универсальное средство подъема;
- съемные грузоподъемные устройства и комплекс группового действия;
- бортовые емкости плавучести (понтоны) для эксплуатации грузоподъемного комплекса группового действия;
- грузозахватные устройства различных типов;
- разнообразное оборудование для обеспечения подводно-технических работ и неавтономные подводные аппараты различных типов для длительной работы в море, подвешенные под мостом универсального средства подъема.

Важнейшей проблемой реализации комплексной технологии является обеспечение ядерной и радиационной безопасности на всех этапах обращения с ядерно- и радиационно-опасными подводными объектами. Рассмотрение этой проблемы в рамках настоящей статьи представляется затруднительным и является темой для отдельной публикации.





Класс ФАУ «РМРС» – K HELIDECK



Длина наибольшая, м	–	137
Ширина наибольшая, м	–	35
Ширина корпусов, м	–	10
Расстояние между корпусами, м	–	15
Высота бортов корпусов, м	–	12
Высота до палубы моста, м	–	22.5
Водоизмещение порожнем, т	–	11000
Осадка порожнем, м	–	4.5
Масса груза, т	–	6000
Водоизмещение с грузом, т	–	17000
Осадка с грузом, м	–	6.8

Рис. 4. Технический облик УСП проекта 23570

Судовладелец – ФГУП «Атомфлот» ГК «Росатом»		Длина наибольшая, м	260
Сроки ввода в строй – 2016 год		Ширина наибольшая, м	32,2
Прогноз срока эксплуатации – до 2030-2035 гг.		Водоизмещение полное, т	62000
Завод-строитель – «Залив», г. Керчь, 1988 г.		Скорость хода на чистой воде, узел	21
Тип судна – одновинтовой, однопалубный атомоход		Ледопроходимость, м	1,0-1,5
		Автономность, мес.	

Рис. 5. Атомный лихтеровоз «Севморпуть»

Очистка островов и прибрежных территорий арктических морей от загрязнений

Не менее актуальными являются задачи оценки экологического ущерба и реализации проектов по ликвидации экологических последствий прошлой хозяйственной и иной деятельности на островах и прибрежных территориях арктических морей Российской Федерации.

В двадцатом веке в Арктике была создана мощная индустриальная база с ярко выраженной сырьевой направленностью, формирующая до 12-15% валового продукта страны и обеспечивающая около 25% процентов ее экспорта. В результате хозяйственной и иной деятельности на островах и прибрежных территориях арктических морей Российской Федерации в значительной мере возросла техногенная и антропогенная нагрузка на окружающую среду, что привело к формированию на них особо неблагоприятных зон с высоким уровнем накопленного экологического ущерба.

Арктическое побережье и многие острова Арктической зоны Российской Федерации загрязнены промышленным и строительным мусором, металлическим ломом, различным оборудованием и контейнерами, а также огромным количеством железных бочек (от 4 до 12 млн бочек) и цистернами с остатками горючесмазочных материалов. По оценкам специалистов ВНИИ ГО ЧС природа Арктики не в состоянии переработать отходы даже за сотни лет. В связи с этим возникла проблема ликвидации накопленного экологического ущерба.

Решение этой проблемы отнесено к первому этапу реализации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года, утвержденной Президентом Российской Федерации 08.02.2013 года (далее Стратегия), которая предусматривает реализацию приоритетных проектов по ликвидации экологических последствий прошлой хозяйственной и иной деятельности в Арктической зоне Российской Федерации, включая оценку причиненного экологического ущерба.

Не менее значимыми работами в рамках этого направления являются реализация мероприятий по очистке островов и прибрежных территорий от загрязнений, а также минимизация негативного антропогенного воздействия на окружающую среду Арктической зоны Российской Федерации в будущем.

Для интенсификации решения указанной проблемы планируется выполнение ОКР по разработке комплексной технологии, транспортно-технологической системы и опытных образцов технических средств для проведения работ по очистке островов и прибрежных территорий арктических морей от загрязнений и утилизации образовавшихся отходов.

Дополнительно в указанную работу включены исследование проблемы и оценка причиненного ущерба от прошлой хозяйственной и иной деятельности на островах и прибрежных территориях арктических морей, прогноз структуры и объема «северного завоза», накопление и оптимизация обращения с отходами производства и потребления с учетом перспектив социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации и разработка концептуальных проектов транспортных судов нового поколения, обеспечивающих «северный завоз».

Второй значительной проблемой в области обеспечения экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации, в условиях ее интенсивного комплексного социального и экономического развития, является задача создания и развития эффективной системы обращения с отходами производства и потребления, их максимального вовлечения в хозяйственный оборот, ограничение ввоза на территорию этой зоны продукции, тары и упаковки, утилизация которых технологически не обеспечена, а также вопросы сбора и утилизации аварийных разливов нефти на труднодоступных для традиционных судов акваториях.

Решение этих двух задач, с учетом неразвитой традиционной транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации, требует создания и функционирования на долгосрочный период комплексной технологии, транспортно-технологичес-

кой системы и технических средств на базе элементов морского и речного транспорта.

Реализация мероприятий по охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности является необходимым условием устойчивого социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации, обеспечения национальной безопасности страны и утверждения престижа России в Арктике.

В рамках указанной ОКР предполагается решить следующие задачи:

- исследование проблемы и оценка причиненного экологического ущерба от прошлой хозяйственной и иной деятельности на островах и прибрежных территориях арктических морей;
- разработка и обоснование проекта перечня приоритетных проектов по ликвидации экологических последствий прошлой хозяйственной и иной деятельности на островах и прибрежной зоне арктических морей;
- прогноз структуры и объемов «северного завоза» и накопления отходов производства и потребления с учётом перспектив социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации;
- разработка проекта концепции комплексной технологии, транспортно-технологической системы и технических средств ликвидации последствий прошлой хозяйственной и иной деятельности и последующей утилизации образовавшихся отходов, включая оценку возможности использования атомного лихтеровоза «Севморпуть», спроектированного в ЦКБ «Балтсудопроект» ФГУП «Крыловский государственный научный центр (рис.5);
- разработка проекта концепции обеспечения «северного завоза» и обращения с отходами производства и потребления с учетом перспектив социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации;
- разработка концептуальных проектов опытных образцов технических средств для транспортно-технологической системы ликвидации загрязнений и утилизации образовавшихся отходов на островах и прибрежной зоне арктических морей, включая оценку возможности использование атомного лихтеровоза «Севморпуть»;
- разработка концептуальных проектов транспортных судов нового поколения, обеспечивающих «северный завоз» грузов и вывоз продукции, в том числе в транспортной системе «река-море», включая:
  а) ледокольно-транспортное судно для обеспечения «северного завоза»;
  б) транспортное судно для эксплуатации в транспортной системе «река-море»;
  в) опытные образцы плавучих средств на базе лихтеров и морских контейнеров;
  г) специализированные лихтера для перевозки грузов различных видов;
  д) адаптированные к условиям «северного завоза» морские контейнера для грузов различных видов;
- разработка концептуальных проектов опытных образцов плавучих средств на базе лихтеров (специализированных лихтеров) и морских контейнеров для реализации перспективных транспортно-технологических систем «северного завоза» и оптимизация обращения с отходами производства и потребления с учетом перспектив социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации, включая:
  а) опытные образцы мобильных модулей на базе лихтеров и морских контейнеров для реализации транспортно-технологической системы ликвидации загрязнений и утилизации образовавшихся отходов, в том числе:
  б) мобильный модуль для временного хранения и транспортировки лома черных и цветных металлов, промышленного и строительного мусора;
  в) мобильный модуль с оборудованием для утилизации отходов на месте образования;
  г) мобильный жилой модуль для персонала выполняющего работы по ликвидации загрязнений;
  д) мобильный энергетический модуль;
  е) мобильный склад продовольствия;
  ж) мобильный модуль бытового обслуживания;
  з) мобильный модуль горюче-смазочных материалов.

Разрабатываемая комплексная технология, транспортно-технологическая система, опытные образцы технических средств, транспортные суда предназначены для проведения работ по очистке островов и прибрежных территорий арктических морей от загрязнений и утилизации на месте образовавшихся отходов, а также обеспечение «северного завоза» и оптимизация обращения с отходами производства и потребления, с учетом перспектив социально-экономического развития арктической зоны Российской Федерации.

Библиографический список

1. Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л. Приоритетные проекты программы реабилитации арктических морей от затопленных и затонувших ядерных и радиационно опасных объектов и необходимость международного сотрудничества //Арктика: экология и экономика, 2012, №4 (8). С. 4-15.
2. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические последствия и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей / А.А. Саркисов, Ю.В. Сивинцов, В.Л. Высоцкий, В.С. Никитин. – М.: ИБРАЭ РАН, 2009. С. 82.
3. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга – 2000») / Ю.В. Сивинцов, С.М. Вакуловский, А.П. Васильев и др. – М.: ИздАТ, 2005. С. 624.
4. Соколов Ю.И. Арктика: К проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: экология и экономика, 2013, №2 (10), С. 18-27.
5. Стратегическая программа действий по охране окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации (одобрена Морской коллегией при Правительстве Российской Федерации). – М., 2009.
6. Послесловие к «Белой книге» (комиссии А.В. Яблокова). Доклады международного семинара 19-21 января 1998 г. – Нижний Новгород: ОАО «ЦКБ «Лазурит», 1998. С. 197.
7. Проект создания экологического кластера в Арктической зоне Российской Федерации. – М.: ООО «ЦЭСП». С. 18.

ДЕЙСТВИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА РЕАБИЛИТАЦИЮ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА ОТ ЗАТОПЛЕННЫХ ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Билашенко Вячеслав Петрович — Старший научный сотрудник Института безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН), кандидат технических наук

Сотников Владимир Андреевич — Инженер Института безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН)

АННОТАЦИЯ

Приведены причины отсутствия окончательного решения по затопленным объектам, озвучена проблема действий, направленных на реабилитацию арктического региона от затопленных ядерно- и радиационно-опасных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Реабилитация морских акваторий, Затопленные ядерно-опасные объекты, Затопленные радиационно-опасные объекты, Оценка рисков, Реабилитация северных морей

На сегодняшний день трудно переоценить возрастающую роль Арктического бассейна как новой транспортной магистрали, источника энергоресурсов и полезных ископаемых, а также как особо значимой территории России в военном и экономическом аспектах. Недавними примерами развития региона можно считать получение в конце 2014 г. сверхлегкой нефти с месторождения «Победа» на шельфе в Карском море. Общие запасы энергоресурсов на месторождении по предварительным оценкам составляют более 300 млрд м^3 газа и свыше 100 млн т нефти, а в целом на арктическом шельфе – свыше 13 млрд т нефти и 70 трлн м^3 газа. С географической точки зрения значительные запасы углеводородов сосредоточены в Карском и Баренцевом морях (44 и 26% соответственно). Для масштаба стоит отметить, что добыча нефти в России последние несколько лет составляет около 500 млн т в год, а газа - примерно 600 млрд м^3.

Изменяющиеся погодные условия и последствия глобального потепления дают возможность значительно сократить транспортные и временные затраты на доставку грузов из Азии в Европу именно по территориальным водам России – по Северному морскому пути (не используя Суэцкий канал). В октябре 2014 г. ОАО «ОКБМ Африкантов» и ООО «Балтийский завод – Судостроение» заключили договор, по условиям которого ОКБМ изготовит и поставит на Балтийский завод комплект оборудования для двух реакторных установок РИТМ-200, предназначенных для первого и второго серийных атомных ледоколов проекта 22220 (ЛК-60я). В перспективе, круглогодичную навигацию по Северному морскому пути обеспечат ледоколы типа ЛК-110я, разработка конструкторской документации которого, ожидается, завершится в 2016 г.

Расширение морской деятельности, особенно добычи полезных ископаемых и увеличение грузоперевозок, требует повышенного внимания к экологической безопасности, что отмечено Государственной программой Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года». Потенциальные экологические угрозы, связанные с развитием региона, стоит дополнить радиационными рисками, источниками которых являются затопленные ядерные и радиационно-опасные объекты, ряд из которых находится в зонах возможной добычи углево-

дородов либо в зоне интенсивных морских путей при освоении.

На сегодняшний день на дне Арктических морей находятся более 17 тысяч ядерных и радиационно-опасных объектов, которые были затоплены или аварийно затонули в период с 1961 по 2003 годы. Ввиду того, что значительная часть из этих объектов в результате естественной дезактивации морской водой перестала представлять какую-либо опасность для человека, следует рассматривать и подвергать всесторонней оценке на сегодняшний день несколько десятков объектов от общего количества:

- 3 атомных подводных лодки с отработавшим ядерным топливом (две затонули, одна затоплена);
- 2 реакторных отсека с отработавшим ядерным топливом;
- 1 экранная сборка атомного ледокола с отработавшим ядерным топливом;
- 1 баржа с реактором атомной подводной лодки с отработавшим ядерным топливом;
- 3 реакторных отсека атомной подводной лодки без отработавшего ядерного топлива;
- 1 реактор без отработавшего ядерного топлива;
- 19 судов с твердыми радиоактивными отходами.

Проведенные в различное время экспедиции в районах затопления объектов не выявили региональное влияние затопленных объектов с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами на радиоэкологическую обстановку в арктическом регионе. К таким экспедициям можно отнести:

- Росгидромета РФ в Белом, Карском и Баренцевом морях 1970-1997 гг.;
- Росгидромет, ГЕОХИ РАН – Норвежское море, 1989, 1991 гг.;
- Российско-норвежская экспедиция 1992-94, 2012 гг.;
- Росгидромет РФ, заливы Карского моря, 2001-2009 гг.

Причина состоит в том, что наиболее опасные затопленные объекты, особенно с ОЯТ, имеют специальную многоступенчатую защиту, предотвращающую непосредственный контакт ядерного топлива с морской водой. Специальная подготовка объектов перед затоплением способна значительно отсрочить аварийные ситуации, однако, в агрессивных условиях морской среды в результате деградации защитных барьеров наступит момент начала выхода долгоживущих техногенных радионуклидов в морскую воду, т.е. ныне потенциально опасные источники со временем превратятся в реальные.

Проблема состояния и обращения с затопленными ядерными и радиационно-опасными объектами (ЗЯРОО) рассматривалась и была признана актуальной на пяти пленарных заседаниях и семинарах Контактной экспертной группы МАГАТЭ по обращению с отработавшим ядерным топливо и радиоактивными отходами. В документах встречи лидеров Большой восьмерки в Довиле (Франция) в 2011 году это направление отмечено, как одно из возможных для продолжения Глобального партнерства.

Причин того, что окончательного решения нет ни по одному из затопленных объектов на сегодняшний день несколько:

1. Принадлежность объектов и организация работ

До 1986 г. захоронения радиоактивных отходов в арктических морях осуществляли как ВМФ, так и Мурманское морское пароходство (ММП), в котором такие отходы возникали в результате эксплуатации атомного ледокольного флота. Стоит отметить, что постановление о затоплении того или иного объекта, его специальная подготовка, организация соответствующих работ и т.д. проводились по совместному решению руководителей различных ведомств: Министерство обороны, Министерство среднего машиностроения, Министерство судостроительной промышленности СССР и др., а по завершении работ ведомственная ответственность за объект не закреплялась. Таким образом, сегодня подавляющее большинство затопленных объектов не имеют четкой принадлежности, и, скорей всего, должны быть зоной ответственности Госкорпорации «Росатом», Министерства экологии и природопользования, Министерства природных ресурсов РФ, а может

быть, в перспективе по опыту создания контролирующего Министерства на Дальнем Востоке в России будет создано Министерство по развитию арктических территорий, которое возглавит организацию и координацию работ. Отсутствие заинтересованного ведомства так же не позволяет говорить об источниках финансирования, определении очередности работ и назначении ответственных исполнителей.

2. Концепция реабилитации морских акваторий

Отдельным вопросом следует отметить отсутствие Концепции реабилитации арктических морей и ответственных за её разработку ведомств. Основополагающей целью Концепции является определение долгосрочной Стратегии реабилитации северных морей, разработка системы взглядов и этапов хозяйственного развития, а также функционально-планировочной организации (систем, структур, программ, планов, проектов и пр.), на основе комплексного анализа внешних и внутренних факторов, учитывающих производственные, экономические, социальные и экологические возможности в условиях ограниченного ресурсного потенциала. Концепция должна включать в себя оценку состояния проблемы, постановку общих целей и задач, формирующих направления и возможности их достижения.

3. Оценка рисков

Для конкретных действий по тому или иному объекту, необходимо оценивать возможные последствия и временные интервалы, на которых целесообразны работы по реабилитации. Под реабилитацией следует понимать комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий, направленных на перевод затопленного объекта в радиационно- и химически-безопасное состояние в соответствии с проектными документами. Согласно указанному определению необходимо:

- классифицировать объекты по активности, уровню опасности, габаритам и др. количественным показателям;
- выполнить предварительную теоретическую оценку общего состояния объектов путем моделирования в целях принятия решения об экспедиционном обследовании тех из них, подъем или перемещение которых возможен и целесообразен;
- определить места затопления и уточнить характеристики мест затоплений ЯРОО: координаты, глубины, гидрология и др., сбор, структурирование информации об активностях и составе, определение техногенных радионуклидов в затопленных объектах (данные по ряду объектов сильно разнятся);
- по объектам, подъем которых предпочтителен, провести комплексные инженерно-радиационные обследования, разработать варианты подъема, сценарии аварийных ситуаций и оценить риски во время работ.

К началу 2015 г. в результате ряда проведенных исследований и конференций уже сформировался иерархический перечень объектов, определяющий их потенциальную опасность. На сегодняшний день группа объектов для подъема (все с отработавшим ядерным топливом) выглядит следующим образом:

- Атомная подводная лодка К-27;
- Реактор с отработавшим ядерным топливом заказа №421;
- АПЛ К-159;
- Экранная сборка атомного ледокола «Ленин» с частью отработавшего ядерного топлива реактора ОК-150 №2;
- Реакторные отсеки с отработавшим ядерным топливом заказов №285 и 901;
- АПЛ «Комсомолец».

Исходя из ряда доводов, можно полагать, что в связи с угрозой возникновения самопроизвольной цепной реакции в обоих реакторах первоочередного подъема требует атомная подводная лодка «К-27», затопленная на глубине 33 м в Карском море. Однако, о последовательности (очередности) подъема остальных объектов нельзя сделать однозначных выводов, т.к. недостатком вышеуказанного перечня является то, что оценки проводились не по единым стандартам Концепции, а рассматривались только с позиции ядерного потенциала без учета социально-значимых факторов.

4. Разработка программы работ

В отсутствие единого подхода и замысла по реабилитации северных морей сложно выстроить строгую последовательность необходимых работ, однако, определенные положительные решения уже есть. Так, например, глобальная работа, требующая больших временных и человеческих ресурсов, по созданию универсального средства подъема подводных потенциально опасных объектов уже проводится во ФГУП «Крыловский государственный научный центр», где функционирует межведомственная группа по подъему подводных потенциально опасных объектов. Разрешение такого рода задачи – от создания эскизного проекта до претворения его в жизнь и спуска на воду технологического судна, потребует до десяти лет работы и то, что выполнение уже началось, позволит рационально использовать время в будущем.

Заключение

В заключении хотелось бы еще раз отметить, что проблема реабилитации для каждого объекта (группы однородных объектов) является многофакторной, что требует всесторонней экспертной оценки с учетом экономических, социальных, юридических аспектов, а также региональных интересов и общественного мнения. Все эти факторы и возможные «узкие места» при выполнении работ должны быть отражены в разработанной Концепции реабилитации арктических морей.

ИБРАЭ РАН имеет опыт разработки документов такого уровня, так как:

- являлся головной организацией при разработке и реализации Стратегического Мастер Плана по снижению ядерных и радиационных угроз на северо-западе России;
- обладает количественными методиками оценки опасности объектов и их ранжирования;
- имеет налаженные взаимодействия с другими академическими институтами по их профильным тематикам и предприятиями, непосредственно реализующими замысел;
- в институте трудятся признанные специалисты мирового уровня по ядерной и радиационной безопасности.

БЕЗОПАСНОСТЬ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЕДЯНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

УДК 624.145

Беккер Александр Тевьевич
Директор Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

Ким Лев Владимирович
Заведующий Научно-конструкторской лабораторией проектирования морских инженерных сооружений ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», кандидат технических наук, доцент, советник РААСН

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены проблемы обеспечения безопасности ледостойких сооружений на шельфе дальневосточных и арктических морей. Описан подход к расчету возможных реализаций экстремальных нагрузок и воздействий, скачкообразных изменений состояния конструкций. Изложены результаты исследований ледовой абразии бетонных опор сооружений на сахалинском шельфе. Рассмотрены способы полуаналитического расчета потоков ледяных образований, учета структурных неоднородностей. Выполнен обзор экспресс-способов диагностики параметров льда. Структурные неоднородности различных масштабов предложено определять как интегральными, так и дифференциальными способами, что позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ сценариев развития ситуаций, оценить риски. Новизна исследований заключается в разработке комплексной теоретико-экспериментальной методики изучения ледовой абразии, вероятностного расчета нагрузок от ледяных образований различного вида и пр. Предложены пути совершенствования мониторинга и диагностики сооружений при ледовых воздействиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Безопасность, Шельф, Сооружение, Ресурс, Лед, Дрейф, Нагрузка, Абразия, Устойчивость

Введение

Дальневосточные территории по сложности проблем строительства и эксплуатации, определяющих безопасность, относятся к зоне повышенного риска. От Камчатки до Японии и далее проходит сейсмический пояс, имеется большое число тектонических разломов. Условия строительства и эксплуатации характеризуются тяжелым гидрометеорологическим режимом, слабо развитой инфраструктурой и другими факторами, которые в совокупности являются более сложными, чем например, в Северном море или море Бофорта [7].

Планы России по освоению шельфа Арктики и дальневосточных морей требуют значительных капитальных вложений в строительство специальных сооружений, включающих объекты портовой инфраструктуры, нефтегазодобывающие платформы, объекты морской техники, трубопроводы и т.д. Первый проект обустройства морского месторождения нефти стартовал в 1998 г. («Сахалин 2») на месторождении Пильтун-Астохское, где был установлен первый в России добывающий комплекс «Витязь», включающий ледостойкую платформу «Моликпак». В 2005 г. установлены ледостойкие платформы для месторожде-

ний Лунское и Пильтун-Астохское (Сахалин 2) и для месторождения «Чайво» (Сахалин 1), в 2012 г. – для месторождения Аркутун-Даги (Сахалин 1). Первая на арктическом шельфе России ледостойкая платформа «Приразломная» установлена на шельфе Печорского моря в 2011 г.

На очереди освоение месторождений углеводородов на арктическом шельфе. Эти проекты предполагают строительство десятков ледостойких платформ, при этом их размеры и материалоемкость будут увеличиваться по мере освоения месторождений расположенных на больших глубинах арктического и субарктического шельфов.

Основными факторами, определяющими конструктивную схему платформ на шельфе, являются параметры дрейфующего ледяного покрова и расчетные случаи формирования нагрузок на сооружение. Учитывая высокую динамику ледяного покрова, можно предполагать возникновение расчетных случаев совместного воздействия на сооружения различных ледяных образований: ровных полей и торосов, дрейфующих торосистых гряд, стамух и пр. При реализации такого сценария могут возникать большие нагрузки, превышающие нагрузки от отдельных ледяных образований.

Необходимы разработки по учету стохастических реализаций нагрузок, прогнозу деградации напряженно-деформированного состояния конструкций в процессе жизненного цикла, что позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ [6]. Анализ сценариев позволяет выбрать конструкции, их элементы, соединения и узлы объекта, которые должны подлежать контролю в процессе эксплуатации объекта.

1. Актуальность исследований

Одной из проблем для замерзающих морей является обеспечение безопасности освоения нефтегазовых месторождений при действии дрейфующих ледяных полей. Сложность задач значительна с точки зрения имеющихся технических, технологических, ресурсных и экологических ограничений при освоении ресурсов арктического шельфа, увеличения доли импортозаменяющих технических средств и технологий. Развитие технологий должны повысить информативность и оперативность системы диагностики и мониторинга. В частности, применительно к ледовым нагрузкам необходим учет возможных реализаций данных нагрузок, деградации конструкций и т.д. на основе вероятностного анализа. Недостаточные объем и достоверность информации о степени соответствия фактических характеристик морских нефтегазопромысловых сооружений (МНГС) требованиям проекта, незамеченные дефекты и т.д. могут существенно ухудшить индикаторы надежности и безопасности.

Анализ рекомендаций отечественных и зарубежных норм по расчету ледовых нагрузок показывает, что в них отсутствует значительная часть расчетных случаев и видов воздействий, которые могут реально возникать в условиях открытой акватории. В мировой практике расчетов ледовых нагрузок различными исследователями обычно рассматриваются только некоторые частные сценарии воздействия какого-либо типа ледового образования на опору сооружения (ровных ледяных и торосистых полей или отдельных торосов).

Существующие нормативные документы США и Канады, а также некоторых других стран, основываются на опыте проектирования и эксплуатации стационарных платформ для климатических условий залива Кука, моря Бофорта, Ботнического и Бохайского заливов, где применялись платформы свайного типа и искусственные острова. Российские стандарты не учитывают в полной мере специфику ледовых условий арктического шельфа, в частности, при оценках ледовых нагрузок от торосов, локального, динамического и истирающего воздействия льда.

В мировой практике на сегодняшний день не существует единого подхода к выбору значений параметров ледяного покрова и ледовых нагрузок. Некоторые исследователи предлагают в качестве расчетных принимать максимально возможные из имеющегося ряда наблюдений значения. Другие рекомендуют вводить в расчет наиболее вероятные значения. При проектировании конструкций для морских условий в настоящее время чаще

всего используются вероятностно-статистические методы определения расчетных параметров ледяного покрова и нагрузок.

Ледовые воздействия можно классифицировать по характеру, направлению, длительности действия, виду действующих ледяных образований (ЛО) и т.п. [6]. Ледовые нагрузки и воздействия возникают при следующих явлениях: горизонтальные перемещения при дрейфе или подвижках ледяных образований под действием ветра, течений, приливов, температурных деформаций и т.п., вертикальные перемещения ледяного покрова при колебании уровня моря, волны, обледенение конструкций. По длительности действия и характеру изменения во времени ледовые нагрузки можно разделить на статические, медленно изменяющиеся, ударные, циклические, динамические. По характеру взаимодействия различают квазистатические воздействия (навал, температурные расширение, подвижки ЛО под действием ветра, течения, изменения уровня моря и т.п.), динамическое воздействие при внедрении и прорезании дрейфующим ЛО сооружения с явлениями смятия, изгиба, пучения, торошения, истирания и др.

Воздействия льда могут стать причиной аварийных ситуаций, поэтому особую важность приобретают вопросы мониторинга технического состояния. К сожалению, российские организации не располагают необходимым опытом проведения мониторинга объектов повышенной ответственности, отечественная приборная база морально устарела. Необходимо выйти на новый уровень организации производства, научной, проектно-конструкторской деятельности. Стоимость зарубежных научно-технических разработок и программ является достаточно высокой, что обусловливает целесообразность проведения самостоятельных теоретических и экспериментальных исследований.

Эффективное управление безопасностью (риск-менеджмент) морских нефтегазопромысловых сооружений (МНГС) предлагается проводить на базе многоуровневой иерархической системы, проведения ее декомпозиции / анализа / синтеза. Безопасная эксплуатация в значительной степени зависит от достоверного определения реакций МНГС на нагрузки и точности методов расчета с учетом структуры, свойств и механизмов дефектообразования и разрушения.

Составной частью процесса оценки рисков при ледовых воздействиях является идентификация деградационных процессов. Точность расчетов зависит от правильного учета структуры, свойств ЛО, закономерностей формирования ледового режима, механизмов разрушения и т.д. Необходимо использовать достижения информационно-компьютерных технологий, новых приборов и методик для совершенствования технологий мониторинга состояния сооружений. Это позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ сценариев развития ситуаций, оценить риски и т.д.

1.2. Исследование ледовой абразии опор МНГС

Созданный в 2014 г. R&D центр «Арктика» ДВФУ имеет ряд соглашений с нефтяными (ОАО «Роснефть»), строительными (Kvaerner Concrete Solutions), проектными (Multiconsult) компаниями, университетами (СПбГПУ, НИИСФ РААСН, Норвежский университет науки и технологии, Мемориальный университет Нью Фаундленда, Даляньский технологический университет и др.). Эти соглашения направлены, в том числе на развитие исследований в области свойств морского льда, особенностей формирования ледовых нагрузок и воздействий. Участие индустриальных партнеров и университетских научных групп намечено по следующим приоритетным направлениям: формирование экстремальных ледовых нагрузок, ледовая абразия, материалы для арктических сооружений, приборы для ледовых исследований.

Эти направления исследований являются очень важными, определяющими в проектировании надежных МГНС, поскольку конструкционные материалы, из которых они возводятся, служат в суровых условиях севера. Стальные конструкции становятся хрупкими, поэтому практически большинство платформ в Арктике бетонные.

Однако, бетон в зоне контакта с дрейфующим ледяным покровом, истирается с образованием дефектов [1, 4]. Процесс формиро-

вания ледовых воздействий в значительной степени определяется механизмом разрушения ЛО в зоне контакта, который влияет на динамические характеристики процесса взаимодействия и величину истирающего воздействия. Плотность бетона снижается, увеличивается пористость, уменьшается сопротивляемость циклам замораживания - оттаивания. Износ вызывает ускоренную коррозию и оголение арматуры, потерю толщины и соответственно несущую способность опор.

Бетонная поверхность под механическим воздействием ледяных образований воспринимает воздействие выступами шероховатости с вкраплениями заполнителя. Основным инструментов воздействий льда при истирании являются ледяные кристаллы. На механизм истирающего воздействия льда влияют: структура, размеры кристаллов льда, его прочность, контактное давление и время (или путь воздействия). Выступы в бетоне и льду могут иметь одинаковый порядок или отличаться, что предопределяет различные механизмы изнашивания. В бетоне в первую очередь разрушается цементный камень, а затем крупный и мелкий заполнитель. Выступающие элементы заполнителя вдаливаются в камень, часть из них дробится и перемещается под действием сил трения. Цементный камень обеспечивает устойчивость до тех пор, пока достаточно большое количество частиц заполнителя не начнет соприкасаться с истирающим льдом. Затем нагрузка в сочетании с воздействием низких температур и влажности разрушает связи цементного камня и заполнителя.

В результате неблагоприятных сочетаний нагрузок и воздействий, например, многократно повторяющихся нагрузок от внешней среды, релаксации бетона, попеременного замораживания-оттаивания смачиваемых зон конструкции, перепадов температур воздуха, процессов коррозии, капиллярной усадки, выщелачивания цементного раствора и др. возникают следующие типы абразии: механическая, молекулярно-механическая, коррозионно-механическая и термомеханическая.

Разрушение происходит в виде следующих явлений. Царапание, когда кристаллы льда образует «борозды», которые являются инициаторами трещин. Ударное изнашивание с образованием лунок из-за локальных пластических деформаций цементного камня. Выкрашивание – результат циклического усталостного воздействия на цементный камень и заполнитель.

В ходе исследований 2009-2010 гг. ДВФУ совместно с компанией «Гидротекс» по заказу корпорации «Акер Солюшнс» создали испытательный стенд на ледовую абразию, разработали программные продукты для расчета ледовых нагрузок и величины абразии [1-3, 6]. Было установлено, что факторами, влияющими на истирание бетона «в точке», являются: давление на контакте «лед-сооружение», путь взаимодействия (истирания) между сооружением и ледяным полем в точке контакта, температура льда, сопротивление материала конструкции и его компонентов истиранию.

Опыт эксплуатации платформ на шельфе Охотского моря (Пильтун-Астохское, Лунское, Аркутун-Дагинское месторождения и др.) показал, что ледовая абразия является опасным явлением, и может вызвать разрушение материала в зоне переменного уровня. Это вызвано особенностью ледового режима данной акватории, в частности, высокими контактными давлениями и высокими скоростями дрейфа ледяных образований (до 1,8 м/с).

Параметры дрейфующего льда определяют конструктивные решения опорной части ледостойких МНГС, влияют на его динамику, и существенно сказываются на параметрах и формах разрушения ледяного поля при взаимодействии с конструкцией. Процесс ледовой абразии происходит при обтекании МНГС ЛО различных видов (битый лед, сплошные поле и пр.). За расчетный срок эксплуатации (обычно 30-40 лет) это приводит к уменьшению толщины опоры на несколько десятков сантиметров, т.е. к оголению арматуры.

Общая протяженность льда, проходящая через участок месторождения, представляет собой косвенную меру суровости ледового режима в отношении нагрузок на конструкцию. Например, в районе месторождения «Аркутун-Даги» за ледовый сезон проходит в среднем 306 км наслоенного льда и 2138 км ровного льда, в районе месторождения

«Луньское» - 180 км наслоенного льда и 1250 км ровного, на месторождении «Пильтун-Астохское» – 275 км наслоенного и 1925 км ровного. Среднее давление льда составляет величину порядка 1-3 МПа, локальные давления по данным разных исследователей могут достигать 15-42 МПа. Такие высокие давления вызывают проникновение воды, находящейся на границе контакта льда и бетона, в поры бетона.

Взаимодействие потоков ЛО в распределенной системе обусловливает волновой характер пластического течения. Процесс пластического течения протекает одновременно на различных структурных уровнях, масштаб которых определяется геометрией сооружения и размерами структурных неоднородностей.

Математическое описание такой сложной и многокомпонентной структуры, как дрейфующий ледяной покров, представляет собой значительные трудности, что главным образом связано с нелинейным характером параметров, входящих в структуру, и нелинейными процессами внутри ее. Необходимо рассматривать отдельные расчетные ситуации с ЛО (обломочный лед, поля, торосы, айсберги) и для каждой ситуации разработать математические модели [3].

Сравнительный анализ используемых расчетных методов для ледовых нагрузок показал, что значения различаются до десяти раз [5]. Через 10 лет эти расхождения значительно уменьшились, но все равно еще значительны (до трех раз). Большие расхождения в значениях расчетных нагрузок, определенных по существующим методикам различными исследователями, обусловлены следующими причинами.

Во-первых, высокой степенью пространственно-временной изменчивости свойств и существенной неоднородностью ледяного покрова и их недостаточным учетом, во-вторых, разнообразием свойств льда при взаимодействии с конструкциями, а также несовершенством принятых в нормах расчетных моделей. Решение этой проблемы требует постановки широкого комплекса экспериментальных исследований ледового режима с целью определения наиболее вероятного диапазона и характера изменчивости функциональных параметров, обуславливающих величину и характер нагрузок в течение ледового периода, а так же особенностей состояния системы «лед-сооружение» в конкретном физико-географическом районе.

Для определения интегральных плотностных характеристик массива, представленного различными типами структурных неоднородностей, достаточно определить эти характеристики для каждой разновидности льда и для каждого типа структурных неоднородностей, найти средневзвешенное значение в зависимости от весовой части в «смеси». Деформационные характеристики льда, в отличие от плотностных, обусловливаются еще и их механическими свойствами и свойствами их контактов, и особенностями взаимного расположения компонент.

В отличие от плотностных и деформационных характеристик прочностные свойства подчиняются схеме «избирательности-независимости», поскольку разрушение происходит в наиболее слабом звене – «структурной неоднородности». Для определения интегральных плотностных характеристик ЛО, представленного различными типами структурных неоднородностей, достаточно определить эти характеристики для каждого типа ЛО и для каждого типа структурных неоднородностей, найти средневзвешенное значение в зависимости от весовой части в «смеси».

Поскольку вид, размеры и свойства структурных неоднородностей отдельных порядков резко отличаются друг от друга, применяют различные способы экспериментального определения характеристик. К образцам 1-го порядка предъявляются требования достаточной представительности и однородности, с тем, чтобы они не включали структурных неоднородностей других, более низких порядков. Для неоднородностей высоких порядков следует применять метод непосредственного определения прочностных характеристик по их поверхностям.

Реологические свойства льда определяются на основе теории линейных наследственных сред с использованием в качестве функции ползучести степенной зависимости. Параметры ползучести α и δ определяют в лабораторных условиях при поперечном изгибе и

одноосном сжатии. На 1-м этапе устанавливают пределы прочности и общий характер деформирования, на 2-м этапе – характер развития реологических процессов и определяют параметры ползучести образцов льда во всем диапазоне изменения нагрузок.

Основой методики расчета является вероятностная имитационная модель формирования ледовых нагрузок, основанная на выводе функции распределения параметров ледового режима и имитации возможных ситуаций, характеризуемых случайным сочетанием значений входных параметров [6]. На основе разработанных расчетных моделей взаимодействия «лед-сооружение» можно выполнять расчеты режима нагружения сооружений за жизненный цикл, для чего используются разработанная Беккером А.Т. модель процесса механического взаимодействия ледяных полей с сооружением. В результате численного моделирования определяются вероятностные характеристики ледовой нагрузки, контактного напряжения в ледяной плите, длины пути взаимодействия, глубины истирания материала корпуса конструкции и т.п.

На запатентованном испытательном стенде Ледовой лаборатории ДВФУ с помощью эмпирической модели абразии бетона выполнены расчеты ежегодной/суммарной абразии материала конструкции [1, 2]. Необходимые для расчета значения общей глубины ледовой абразии бетона, контактное напряжение в ледяной плите σ и длина пути истирания определяются на основании теоретических исследований, разработанного алгоритма и компьютерные программы расчета, на которые получены три патента.

Взаимодействия между ЛО и сооружением является сложным явлением с влиянием различных факторов. Глобальная нагрузка определяется по среднему контактному давлению, однако локальное давление неравномерно и зависит от кристаллической структуры и других факторов [8].

Крайне актуально сейчас обеспечить изучение механических свойств льда и ЛО в целом для идентификации количественных зависимостей прочности материала. Для этого необходимы модели, описывающие поведение ЛО, установление связей между измерениями, природным состоянием, методами испытаний.

Изучение закономерностей поведения ЛО, построение моделей и методов расчета процессов взаимодействия ЛО с сооружениями и разрушения ЛО на основе дискретно-континуальных и численно-аналитических методов развивается сотрудниками центра «Артика» ДВФУ.

В классе моделей дискретных сред выделены модели блочных сред. Поле состоит из блоков с реальными размерами, учитываются силы взаимодействия между блоками как распорной зернистой (гранулированной) среды. В принятом нами подходе иерархическая структура неоднородных ЛО представлена в виде следующих уровней элементов системы: поля; структурные блоки и микроблоки [2].

Макромодели обтекания МНГС потоком ЛО можно разделить на три группы:

1) кинематические типа Лайтхилл-Уитмена и др.);
2) модели 2-го порядка;
3) модели на основе кинетических уравнений.

Нами использована кинематическая модель на основе следующих допущений.

Суть метода заключается в представлении ЛО в виде дискретной модели, составленной из блоков различной формы и конфигурации [3]. Движение блоков идет вдоль линий тока, изучаемых в абсолютной и относительной системе координат. Используется подход теории транспортных потоков с соблюдением баланса масс и контактных взаимодействий ледяных блоков между собой и с опорами сооружения.

Ледовые блоки находятся в стадии неустойчивого гидростатического равновесия, нарушаемого эндогенными и экзогенными процессами. Они находятся в непрерывном движении, которое характеризуется различной направленностью и интенсивностью в зависимости от изменения нагрузочных факторов. Блоки образуют матричный каркас, а между блоками – заполнитель в виде дисперсной фазы.

Распределение напряжений в блоках на их интерфейсах принимается согласно коэффициентам распределительной способности для зернистой среды. Уравнение баланса количе-

ства движения связывает нагрузку с изменением компонент радиального напряжения, а поток импульса определяется давлением и орбитальной скоростью блоков, вкладом турбулентных пульсаций скорости блока, и потоком импульсов в «активной» зоне деформации.

Скорость деградации при ударных воздействиях ЛО определяется уравнением Аррениуса. Параметр «температуры» определяет режим нагружения, а для ЛО – режим движения потока (гравитационный или вязкостный). Деградация бетона сопровождается накоплением дефектов, фрагментацией и трещинообразованием. Предлагаемый подход позволяет моделировать различные сценарии взаимодействия «лед-сооружение» на единой базе с учетом инструментов современных информационных технологий.

1.3. Мониторинг МНГС

Теоретические исследования должны подкрепляться расширением знаний о реальных процессах и их индикаторах для конкретного района расположения будущих МНГС. Проведение инженерных изысканий является дорогостоящим и длительным процессом. По требованиям норм данные должны быть получены за период не менее пяти лет. Поэтому технологии изысканий, контроля и мониторинга должны совершенствоваться с учетом типа и конструктивных особенностей сооружений, функционального назначения и природно-климатических условий и т.д. Целью является повышение информативности, оперативности и доступности анализов, объективный выбор способов поддержания эксплуатационной надежности и безопасности МНГС.

Техническая диагностика основывается на иерархической структуре контроля сложной системы, включающей «контрольные операции – диагностические процедуры – элементарные проверки». На каждом этапе существуют комплексы неопределенностей разной значимости.

На первом этапе, этапе сбора данных, неопределенности информации характеризуется следующими факторами: нечеткость, неоднозначность, неполнота, противоречивость, неточность, достоверность (субъективные и объективные искажения) и т.п.

На втором этапе анализа информации: погрешности после обработки данных и при выполнении расчетов на ЭВМ, несоответствие признаков отказов и дефектов реальной картине, погрешности анализа, несбалансированный набор индикаторов, ошибочные весомости индикаторов, неточность оценок, влияние системы резервирования, влияние организационно-технологических факторов, недооценка критичности несоответствий и т.п.

На третьем этапе синтеза знаний и принятия решений: нечеткость целей и критериев, неполнота знаний о предметной области, неточность оценок эффективности решений, прогнозов последствий решений и т.п.

Методика контрольных операций и проверок приведена в нормативных документах, но в них уделено мало внимания таким диагностическим процедурам, как сравнение, идентификация, интерпретация, классификация. Эти процедуры слабо формализуются, и их выполнение возлагается на инспекторов технического контроля, квалификация и опыт которых может сильно различаться.

Мониторинг должен быть комплексным с применением дистанционных средств (донные станции, полузатопленные и плавучие буи, подводные роботы, аэро- и спутниковая съемка GLANAS, NASA, RADARSAT и GEOSAT), а также локальные контактные измерения (вертолетные десанты, ледокольные экспедиции). Экспедиционные методы, когда судно должно пройти непосредственно через район предполагаемого строительства, ограничены длительностью наблюдений. Если исследования верхнего уровня (экспедиционные методы, спутниковый мониторинг) активно используются, то наблюдения нижнего уровня с помощью донных и притопленных наблюдательных станций, плавающих и заякоренных буев, беспилотных летательных и подводных аппаратов недостаточны для перспективных районов Карского и других морей. Однако без контактных методов невозможно создать многомасштабную информационную модель, которая должна основываться на длительных рядах наблюдений параметров среды, выделения сезонных и стохастических вариаций и т.д.

Необходим учет возможных реализаций запредельных нагрузок и природных воздействий, скачкообразных изменений напряженно-деформированного состояния конструкций объекта в процессе его жизненного цикла, что позволит уточнить модели угроз. Анализ сценариев позволяет выбрать конструкции и их элементы, которые должны подлежать контролю в процессе эксплуатации объекта.

Цель мониторинга включает в том числе и наблюдение за состоянием системы «МНГС – грунтовое основание – внешняя среда» для обеспечения структурной целостности, функциональной работоспособности и безопасности сооружения.

Задачи мониторинга:

- выбор объектов контроля (наиболее ответственных элементов конструкций, определение в них опасных сечений и контрольных точек для установки измерительных приборов);
- выбор методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или создание средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- проведение инструментальных и визуальных наблюдений;
- определение состояния конструкций по данным сопоставления натурных наблюдений с результатами расчетов или с критериальными характеристиками;
- выработка рекомендаций по эксплуатации.

Система мониторинга включает:

Уровень I – первичные датчики и измерительные системы (сейсмографы датчики, давления, акселерометры, тензодатчики и т.д.).

Уровень II – оборудование для сбора, преобразования информации, полученной от первичных датчиков и приборов, в цифровой вид, сохранение с присвоенной меткой реального времени и передачу информации на уровень III.

Уровень III – оборудование для приема информации, визуализации, накопления архивов и результатов расчетов.

Технология работ для надводной и подводной зон ледостойких МНГС различна вследствие использования различных технических средств. В надводной зоне для доступа к поверхностям МНГС используются лестницы (где они имеются), смотровые люки и проходы внутри шахт, плавсредства. Для оптимизации проведения работ освидетельствование проводится в два этапа:

1) зонирование на основе визуального осмотра и выборочных измерений с целью идентификации бездефектных участков (в пределах поля допусков);
2) детальное обследование с целью установления границ дефектных зон и идентификации причин возникновения дефектов.

В подводной зоне используются водолазы и подводные роботы различных видов в зависимости от задач. Подводное освидетельствование зонировано по высоте по способу проведения работ:

а) зона переменного уровня, где скорость деградации наибольшая и выше вероятность обнаружения дефектов;
б) глубинная зона.

Для визуального осмотра внутренних пространств шахт опорных колонн МНГС используются специальные каналы доступа, через люки доступа в верхних строениях, связывающие нижний и верхние настилы МНГС, а также каналы доступа для малогабаритных подводных роботов к нижней шахте стояков и к области фундаментного кессона.

Нами разработан комплекс моделей системы «объект-среда», адекватно отражающий происходящие взаимосвязанные процессы (механические, геологические, гидрологические, технологические и др.). Измерения проводятся на базе двух подходов: Эйлера, в котором анализ текущего состояния позволяет оценить величины нагрузок, и Лагранжа, в котором по известным величинам нагрузок оценивается текущее состояние элементов МНГС.

Рассмотрим интегральные и дифференциальные способы диагностики прочностных параметров льда и ледяных образований. Неопределенность, которая вызывается несовершенством методов отбора образцов для определения прочности льда, приводит к тому, что расчетные значения ледовых нагрузок завышаются. Испытания льда с учётом низких порядков структурных неоднородностей проводятся в натурных условиях (in-situ).

Плотность льда в массиве с достаточной степенью точности (с погрешностью до 3%)

можно определить с помощью гамма-метода, основанного на эффекте различной степени поглощения и рассеяния радиоактивного гамма-излучения в средах с различной плотностью. С этой целью в изучаемом участке массива льда бурят на расстоянии порядка 0,5 м друг от друга параллельные скважины. В одном помещают закрытый источник гамма-излучения, во втором помещают регистрирующий зонд с детектором. Перемещая зонды с источником и детектором вдоль скважин, фиксируют интенсивность гамма-излучения, по тарировочным графикам устанавливают плотность льда.

Деформационные характеристики льда определяют динамическим методом с применением ультразвуковых методов, импульсного метода с измерением времени распространения колебаний при ударе или взрыве и сейсмическим методом. Ультразвуковой метод может быть использован для определения скоростей упругих волн для определения деформационных свойств льда с учётом структурных неоднородностей 1-2 порядка. Сейсмический метод следует применять при исследованиях больших участков ЛО (сотни метров).

Нормативные методики расчета ледовых нагрузок используют такой параметр как кубиковая прочность льда, которая имеет большую вариацию, что требует применения больших значений коэффициентов условий работы и надежности. Профессором ДВФУ Цуприком В.Г. предложено использовать такой параметр как удельная энергия механического разрушения льда [8, 9]. Данный параметр может быть определен методом сброса шарика (индентора).

Индентор является мелкомасштабной моделью как для столкновения цилиндрической опоры с дрейфующим ледяным покровом, так и, например, вдавливания полусферы крупного заполнителя на бетонной поверхности в надвигающуюся поверхность ЛО. Способ основан на определении усилий при статическом или динамическом внедрении индентора в массив на заданную глубину, либо на определении глубины и/или площади внедрения индентора при заданном усилии внедрения. Во время проведения ежегодной Зимней школы по ледовой механике в кампусе ДВФУ в феврале 2015 г. в бухте Новик проведены очередные испытания методом сброса шарика. Это позволит усовершенствовать процедуры проведения испытаний в полевых условиях (in-situ).

В формулу расчета глубины абразии входит эмпирический коэффициент абразии, определяемый в ДВФУ на испытательном стенде, созданном при содействии Роснауки и Фонда Бортника в 2007 г. Известна зависимость этого коэффициента от твердости льда и бетона, однако глубоких исследований этого явления не проводилось. Комплекс исследований динамической прочности провели сотрудники ДВПИ (сейчас ДВФУ) Н.Г. Храпатый и его ученики [8].

Предлагается использовать три инденторных способа: метод сброса стального шара (Drop Ball Method), метод отскока стального шара при скатывании со специального желоба с углом наклона 45°, и способ Бринелля. Различие в размере индентора: в первом случае шар имеет вес 1 кг, во втором порядка 100 г, В – размер индентора порядка 10 мм.

Предлагается дополнить их испытаниями на срез по исследуемой поверхности ледовых структурных неоднородностей, а также испытаниями на кручение. Это два близких способа, однако, при первом в плоскости среза поле напряжений неоднородное, вызывающее явление дил атансии. Кроме того по мере развития среза уменьшается площадь контакта, что вызывает большой разброс величин угла внутреннего трения и сцепления. Кручение (вращательный срез) обеспечивает постоянную площадь контакта для цилиндрических образцов.

Однако вышеупомянутые способы являются экспресс-методами и имеют относительно небольшую точность. К надежным способам относятся дорогостоящие испытания in-situ путем нагружения домкратом участков ледяного поля или прессиометром в скважине. Однако эти способы имеют высокую стоимость из-за необходимости проведения комплекса работ на ледяном поле для учета пространственной неоднородности, зависимости от температуры. Поэтому отсутствие представительной выборки по основным параметрам льда и ЛО требует применения математиче-

ского моделирования и средне- и мелкомасштабного физического моделирования либо в ледовом бассейне, либо на натурном льду.

Заключение

Суровые условия строительства и эксплуатации нефтегазопромысловых сооружений на арктическом шельфе требуют комплексного решения возникающих научно-технических проблем. Параметры дрейфующего льда определяют конструктивные решения опорной части платформ, влияют на его динамику, и существенно сказываются на параметрах и формах разрушения ледяного поля при взаимодействии с конструкцией. Необходимо совершенствование методологии исследования ледовых нагрузок на МНГС. Структурные неоднородности ЛО различных масштабов должны определяться как интегральными, так и дифференциальными способами определения свойств.

Необходим учет возможных реализаций экстремальных нагрузок и воздействий, скачкообразных изменений состояния конструкций. Это позволит уточнить модели безопасности, провести вероятностный анализ сценариев развития ситуаций, оценить риски. Управление безопасностью должно основываться на моделях взаимодействия сооружений со средой, современных компьютерных технологиях и анализе жизненного цикла объектов. Безопасная эксплуатация в значительной степени зависит от достоверного определения ледовой нагрузки и точности методов расчета с учетом структуры, свойств и механизмов разрушения льда.

Анализ проблем мониторинга в арктических условиях показал следующее. Проведение ледокольных экспедиций (с наличием вертолета для высадки «десанта») оправдывает себя на начальном этапе подготовки освоения конкретного месторождения, но основу баз геоданных должны составить мониторинговые измерения с помощью сети стационарных и мобильных станций.

Теоретическая часть работы выполнена по проекту №543 госзадания Минобрнауки РФ, экспериментальная – по гранту Научного фонда ДВФУ.

Библиографический список

1. Bekker A.T., Uvarova T.E., Kim S.D. Abrasion effect of ice cover on supports of hydraulic engineering structures in conditions of Sakhalin island shelf // Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Honolulu, USA, 2003. P. 110-117.
2. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. Physical and Mechanical Properties of Modeling Ice for Investigation of Abrasion Process on Ice-Resistant Offshore Platforms // Proc. Int. Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China, 2010. P. 140-146.
3. Kim L.V. Kinematic analysis of the ice flow around offshore structures // Proc. 14th Int. conference on computing in civil and building engineering, Moscow, June 27-29, 2012. P. 202-209.
4. Problems of the ice cover abrading action on legs of concrete offshore structures // Proc. Workshop Ice Abrasion on Concrete Structures, Helsingfors, Finland, October 25-26, 2007. P. 45-58.
5. Shkhinek K., Blanchet D., Croasdale K. et al. Comparison of the Russian and foreign codes and methods for global load estimations // Proc. Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1994, Vol. 4. P. 75-82.
6. Беккер А.Т. Вероятностные характеристики ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа. - Владивосток: Дальнаука, 2005. 361 с.
7. Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. - М.: Институт «Гипростроймост», 2005. 340 с.
8. Гомольский С.Г., Храпатый Н.Г., Цуприк В.Г. Исследования ударов твердого тела о лед // В кн.: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Ледотермические явления и их учёт при возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. - Л.: Энергия, 1979. С.73-76.
9. Цуприк В.Г. Теоретические исследования удельной энергии механического разрушения морского льда // Вестник НГУ. Серия: Математика, Механика, Информатика. Новосибирск, 2013. С. 119-125.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ОФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ ЧЕРЕЗ НАРУЖНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ

Умнякова Нина Павловна

Заместитель директора НИИ строительной физики РААСН, кандидат технических наук

АННОТАЦИЯ

В данной работе приведена новая методика, позволяющая провести расчет температуры на внутренней поверхности стены при наличии отражательной теплоизоляции, обращенной блестящей поверхностью внутрь помещения. При расчетах по данной методике учитываются коэффициенты излучения всех поверхностей, обращенных внутрь помещения – пола, потолка, стен и пр. Значения температуры на внутренней поверхности, полученные в результате расчета по этой методике, сопоставлены с экспериментальными значениями, полученными в ходе натурных обследований конструкции. Сходимость результатов экспериментальных данных и расчетных значений позволяет использовать методику расчета температуры на внутренней поверхности ограждения с учетом коэффициентов излучения поверхностей в практических инженерных расчетах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Коэффициент излучения, Температура, Излучение, Лучистый тепловой поток, Теплоотдача излучением, Теплоотдача конвекцией, Теплотехнические исследования

При применении блестящих офольгированных материалов на поверхности ограждающих конструкций происходит отражение лучистого потока тепла внутрь помещения, что обеспечивает снижение тепловых потерь через наружное ограждение. При этом при проведении теплотехнических расчетов учитывается только передача теплоты через материал за счет процесса теплопроводности, а лучистая составляющая теплопередачи в расчете не участвует. Причиной этого является отсутствие в настоящее время методики расчета сопротивления теплопередаче стеновой конструкции с учетом отражательных свойств внутренних поверхностей материалов.

Рассмотрим передачу теплоты излучением и конвекцией из объема внутреннего помещения через наружные ограждающие конструкции. При этом принимаем, что абсолютная температура воздуха в помещении составляет $T_в$, ^oK, температура наружного воздуха $T_н$, ^oK, и абсолютная температура внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции $T_{в.п}$, ^oK.

Средний коэффициент излучением всех внутренних поверхностей $C_{ср}$ помещения вычисляется по следующему выражению

$$C_{ср} = \frac{C_{стен}F_{стен} + C_{покр}F_{покр} + C_{пол}F_{пол} + C_{ост}F_{ост}}{F_{стен} + F_{покр} + F_{пол} + F_{ост}}, \quad (1)$$

где $C_{стен}$, $C_{покр}$, $C_{пол}$, $C_{ост}$ – коэффициент излучения поверхности стен, покрытия, пола, остекления, Вт/(м^{2}К^4);

$F_{стен}$, $F_{покр}$, $F_{пол}$, $F_{ост}$ – площадь стен, покрытий, пола, остекления, м^2.

Лучистый падающий тепловой поток $Q_{пад.л.}$, излучаемый объемом воздушной среды с постоянной абсолютной температурой $T_в$, и воспринимаемый внутренней поверхностью наружного ограждения площадью 1 м^2 за 1 ч с постоянной абсолютной температурой $T_{в.п.}$, будет

$$Q_{пад.л} = \frac{C_в C_{ср}}{C_0}\left[\left(\frac{T_в}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{в.п.}}{100}\right)^4\right], \quad (2)$$

где $C_{ср}$ – средний коэффициент излучения внутренних поверхностей помещения, Вт/(м^{2}К^4);

$C_в$ – коэффициент излучения внутренней поверхности, Вт/(м^{2}К^4);

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела равен 5,76 Вт/(м^{2}К^4).

В табл. 1 приводятся коэффициенты излучения различных строительных материалов.

Таблица 1

Коэффициенты излучения материалов [1, 3, 4]

Материалы	**Коэффициенты излучения С, Вт/(м^{2}К^4)**
Алюминий полированный	0,23 – 0,34
Алюминий с шероховатой поверхностью	0,34 – 0,4
Алюминиевая фольга	0,5
Алюминиевая окраска	2,88
Алюминиевый лак на шершавой пластине	2,25
Сталь нержавеющая полированная	0,43
Сталь тонколистовая гладкая	0,57 – 1,15
Сталь тонколистовая	2,3 – 3,45
Железо полированное	0,8 – 2,18
Железо с темно-серой поверхностью	1,78
Железо слегка поржавевшее	3,51
Железо сильно поржавевшее	4,9
Лак черный блестящий, распыленный на пластине	4,95
Лак белый	4,6
Лак черный матовый	5,52
Эмалевая краска	5,18
Асфальт	5,35
Асбестоцемент шероховатый	5,52
Кирпич глиняный обыкновенный шероховатый	5,1 – 5,30
Стекло оконное гладкое	5,41
Толь кровельная	5,86
Штукатурка известковая шероховатая	5,23
Бетон	5,23
Цементный раствор	3,9
Плитка метлахская гладкая	4,69
Плитка	5,35
Вода (слой толщиной 0,1 мм)	5,32
Снег	5,18
Лед	5,25
Песок	4,37

Величина конвективного теплового потока между внутренним воздухом в помещении с абсолютной температурой $T_в$ и внутренней поверхности наружного ограждения 1 м^2 за 1 ч с абсолютной температурой $T_{в.п}$ вычисляется по уравнению

$$Q_к = \alpha_{в.к}(T_в - T_{в.п}), \qquad (3)$$

где $\alpha_{в.к}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией у внутренней поверхности, Вт/(м^2°С).

Количество теплоты, прошедшее за 1 ч через 1 м^2 наружной ограждающей конструкции, составляет

$$Q_{огр} = K(T_{в.п} - T_н), \qquad (4)$$

где K – коэффициент передачи теплоты от внутренней поверхности ограждающей конструкции к наружному воздуху

$$K = \frac{1}{R_к + R_н},$$

где $R_к$ – термическое сопротивление ограждающей конструкции, м^2°С/Вт;

$R_н$ – сопротивление теплоотдачи у наружной поверхности, м^2°С/Вт.

При проведении инженерных расчетов лучистого и конвективного теплообмена принимаем упрощенные схемы расчета на основании работ [1, 5] и не учитываем многократное отражение.

Температура внутренней поверхности $\tau_{в.п}$ вычисляется в результате преобразований уравнений (2), (3) и (4) для стационарных условий с учетом коэффициентов излучения по в следующей зависимости:

$$\tau_{в.п.} = \frac{t_в\left(\alpha_{в.л.} \cdot \frac{C_в C_{ср.}}{C_{пр} C_0} + \alpha_{в.к.}\right) + \kappa t_н}{\alpha_{в.н.} \frac{C_в \cdot C_{ср.}}{C_{пр} C_0} + \alpha_{в.к.} + \kappa}, \qquad (5)$$

где $\alpha_{в.к}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м^2°С);

$\alpha_{в.л}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м^2°С);

$C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м^{2}К^4);

$t_в$ и $t_н$ – температура внутреннего и наружного воздуха, °С.

Расчет температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции $\tau_{в.н}$ по уравнению (5) будет происходить по следующей методике.

На первом этапе в соответствии с данными табл. 1 принимаем коэффициенты излучения всех внутренних поверхностей помещения и по выражению (1) находим среднюю величину коэффициента излучения $C_{ср}$. Затем задаем нормируемую величину температурного перепада между температурой воздуха в помещении и температурой на поверхности ограждающей конструкции согласно СП 50.13330.2012 (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий») и определяем коэффициенты теплоотдачи конвекцией $\alpha_{в.к}$, излучением $\alpha_{в.л}$. По этим параметрам вычисляем температуру на внутренней поверхности ограждающей конструкции $\tau_{в.п}$.

Результаты расчета температуры по данной методике сопоставим с результатами натурных исследований, проведенных в производственном помещении завода ЛИТ в г. Переславле-Залесском Ярославской области. Ограждающие конструкции цеха – стены и покрытие – обшиты с наружной стороны по каркасу стеновым профнастилом ВС-18 (рис. 1 и 2) и с внутренней стороны утеплены офольгированным пенополиэтиленом Пенофол Супер NET толщиной 15 мм. Общий вид промышленного здания приведен на рис. 3.

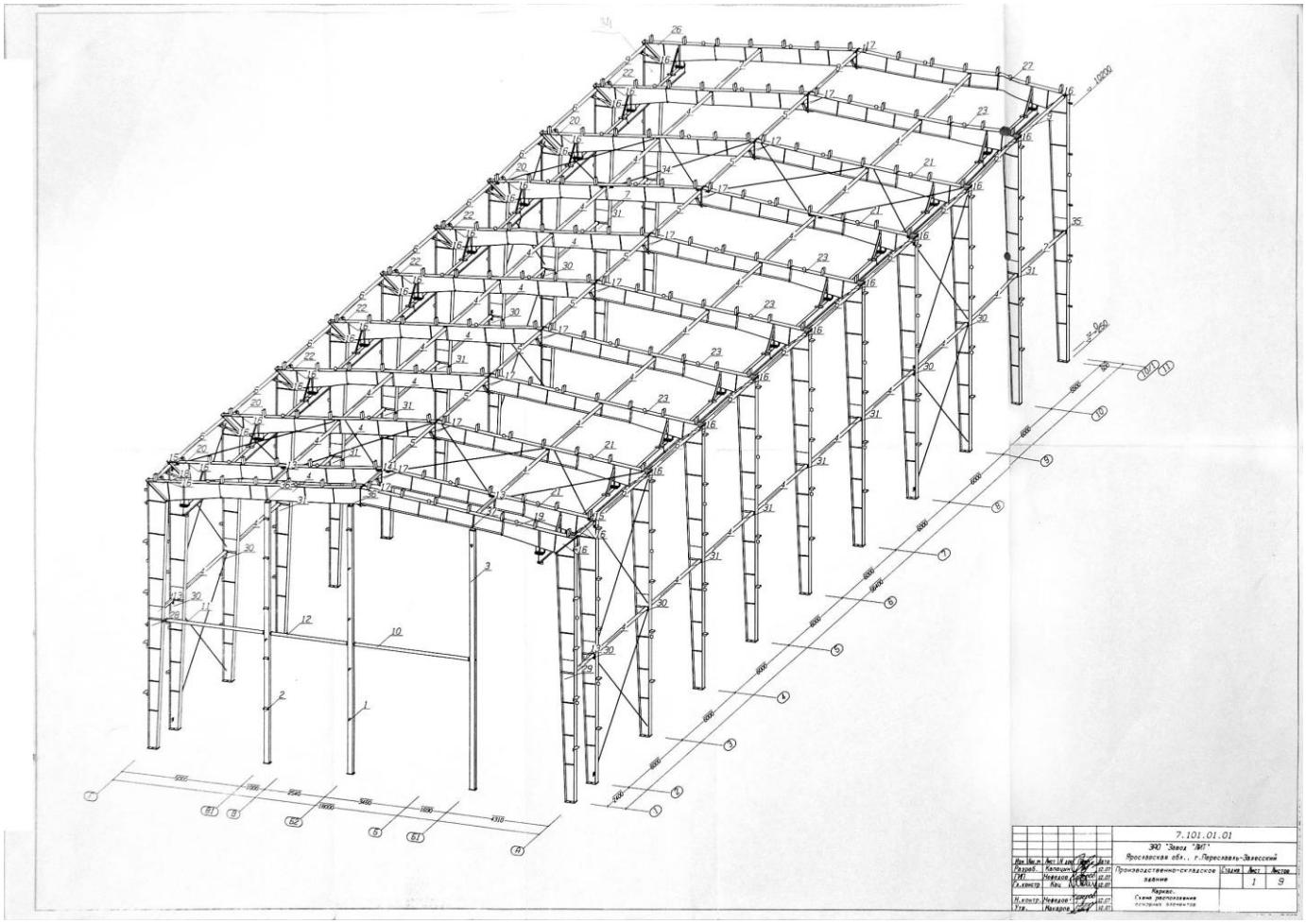


Рис.1. Каркас производственно-складского здания завода ЛИТ

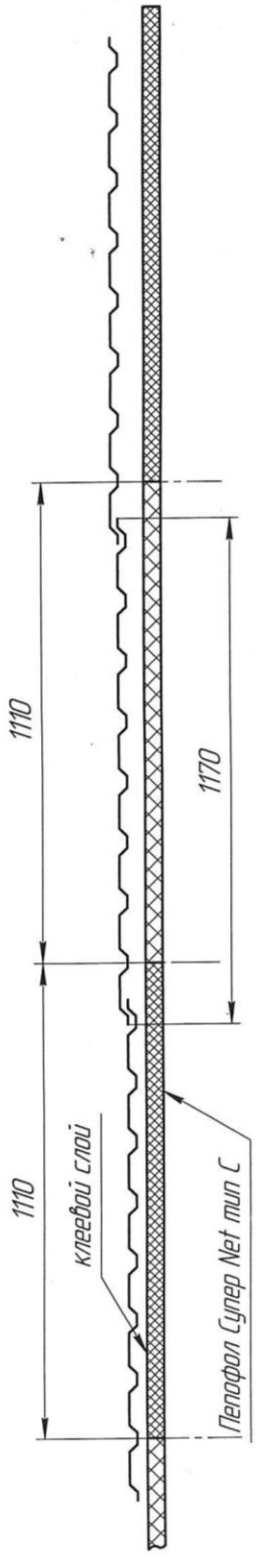


Рис. 2. Конструкция наружной стены производственного-складского помещения завода ЛИТ, выполненная из профилированного металлического настила с офольгированным утеплителем Пенофол Супер NET толщиной 15 мм

В конструкции наружной стены использовался стеновой профилированный металлический настил ВС-18 толщиной 3 мм, изготовленный из оцинкованной стали с полимерным покрытием бежевого цвета RAL 1014 с двух сторон. По нему с внутренней стороны помещения был установлен утеплитель Пенофол Супер NET типа С толщиной 15 мм с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги. Эффективная отражательная теплоизоляция была обращена во внутрь производственного цеха (рис.4). Ее коэффициент излучения составлял $C = 0{,}5$ Вт/(м^{2}ºК^4). В ходе натурных теплотехнических исследований проводились замеры температуры на поверхности ограждения и относительной влажности воздуха с помощью датчиков температуры, термохронов и гигрохронов, замеры тепловых потоков проводились тепломерами.

Натурные теплотехнические исследования происходили в помещении цеха с 15 по 25 января 2013 г. Распределения температуры в сечении А-А ограждающей конструкции, состоящей из профилированного металлического настила и пенофола толщиной 15 мм, на котором отражательная теплоизоляция из алюминиевой фольги обращена внутрь помещения, приводится на рис. 5. Также было получено распределение температур в сечении Б-Б ограждающей конструкции с образованной гофром воздушной прослойкой толщиной 16,5 мм и пенофолом толщиной 15 мм с отражательной изоляцией из алюминиевой фольги, обращенной внутрь помещения.

Величины температурных перепадов при средней за период замеров температуре внутреннего воздуха $t_в = 16{,}9$ºС, наружного воздуха $t_н = -13{,}9$ºС составили для сечения А-А $\Delta\tau' = \tau'_в - \tau'_н = 6{,}9 + 8{,}84 = 15{,}74$ºС и для сечения Б-Б $\Delta\tau'' = \tau''_в - \tau''_н = 7{,}18 + 10{,}18 = 17{,}36$ºС.

На основе обработки результатов измерений и соответствующих расчетов было установлено, что термическое сопротивление в сечении А-А по пенофолу толщиной 15 мм составило 0,3(м^{2}ºС)/Вт[1]. Коэффициент теплопроводности по результатам натурных испытаний пенофола колебался в диапозоне $\lambda = 0{,}047 - 0{,}049$Вт/(м^2 ºС). Термическое сопротивление в сечение Б-Б по пенофолу толщиной 15 мм и воздушной прослойкой толщиной 16,5 мм, образованным гофром в стеновом профнастиле, составил 0,54 (м^2 ºС)/Вт.

Обращает внимание, что воздушная прослойка толщиной 16,5 мм и шириной 90 мм имеет термическое сопротивление 0,24 (м^2 ºС)/Вт. Объяснить это можно низким коэффициентом излучения оцинкованной поверхности стенового профнастила и замкнутостью воздушной прослойки.

[1] При этом термическое сопротивление профнастила толщиной 3 мм и коэффициентом теплопроводности 58 Вт/(м^{2}ºС) не учитывалась. Поскольку эта величина равняется $5{,}17 \cdot 10^{-5}$(м^2 ºС)/Вт.

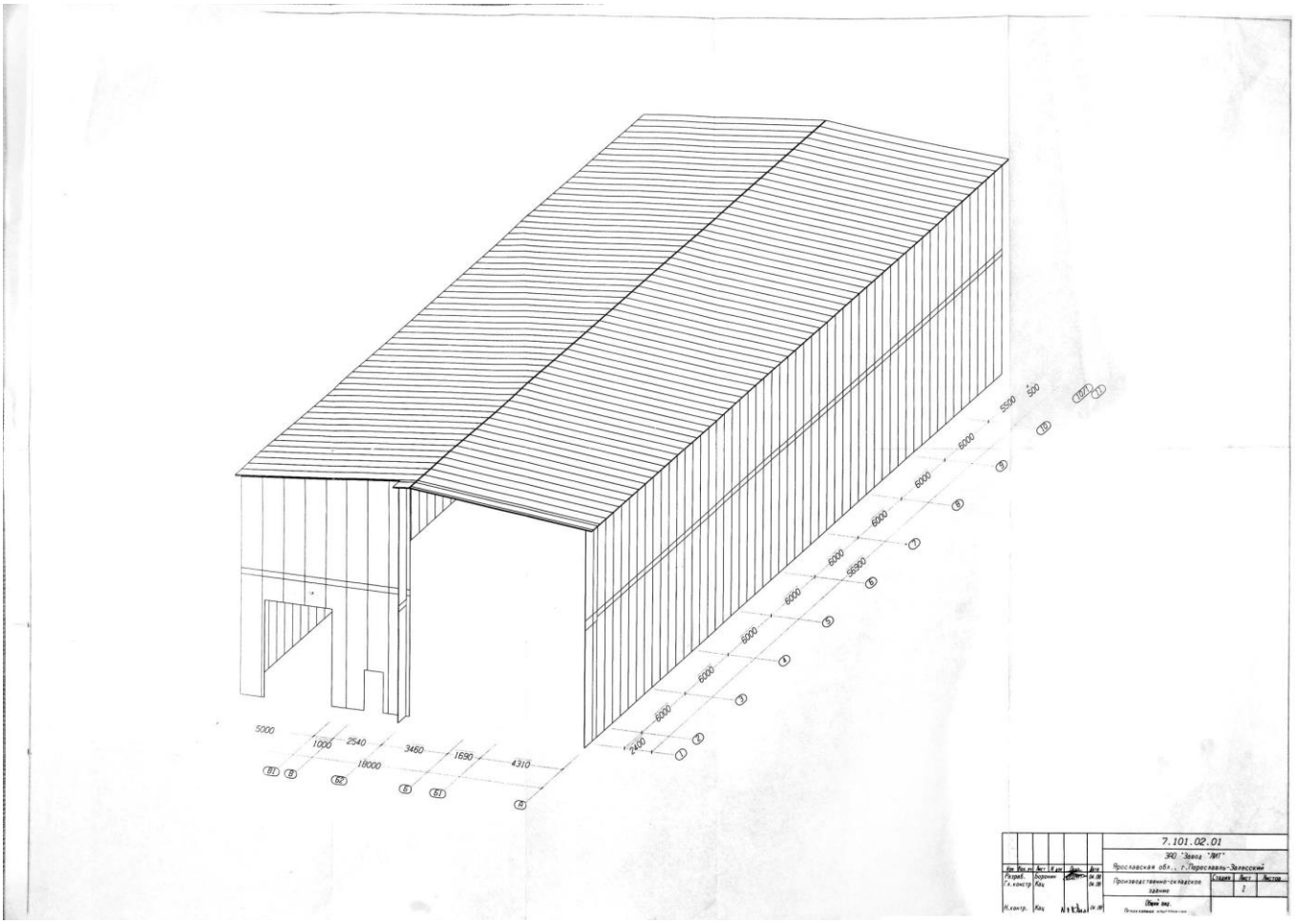


Рис.3. Общий вид промышленно-складского здания завода ЛИТ

Рис.4. Вид производственног помещения завода ЛИТ с наружными стенами, утепленными материалом Пенофол Супер NET с отражательной изоляцией из алюминиевой фольги, обращенной внутрь помещения

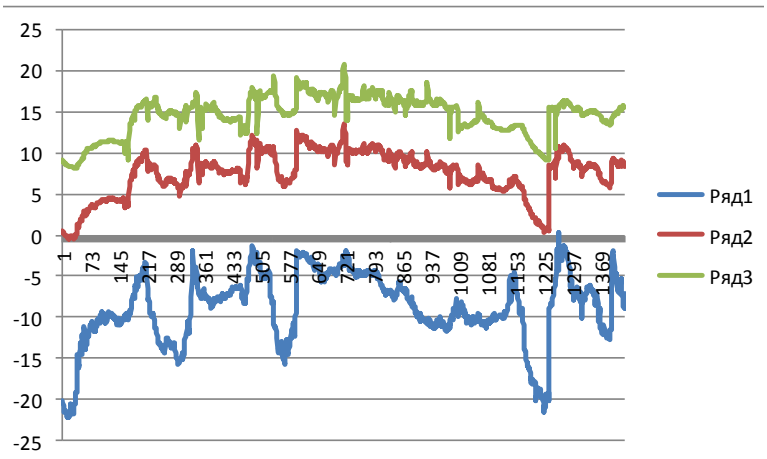


Рис. 5. Распределение температур в сечении А-А северной стены цеха: ряд 1 – температура на наружной поверхности стены; ряд 2 – температура на внутренней поверхности стены; ряд 3 – температура воздуха на расстоянии 160 мм от внутренней поверхности стены

В связи с тем, что рассматриваемая конструкция неоднородна, определение ее теплозащитных свойств проведено с учетом термических сопротивлений, полученных при ее разделении плоскостями параллельными и перпендикулярными тепловому потоку. В результате получена величина термического сопротивления конструкции наружной стены равна 0,36 (м^2 ºС)/Вт.

Известно, что передача теплоты к поверхности и ее отдача происходят за счет конвективного и лучистого теплообмена.

По результатам полученных экспериментальных данных для наружной поверхности коэффициент конвективного теплообмена составил $\alpha_{н.к}$ =20,81 Вт/м^{2}ºС. При определении коэффициента лучистого теплообмена для металлического профнастила коэффициент излучения составил 1,31 Вт/м^2 ºС, для снега – 5,18 Вт/м^2 ºС.

После соответствующих вычислений получаем коэффициент излучения $\alpha_{н.л}$ = = 0,89 Вт/м^2 ºС. Сопротивление теплообмена у наружной поверхности $R_н$= 1/(20,81 +0,89) = = 1/ 20,7= 0,046 Вт/ м^2 ºС.

При определении суммы двух коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена у внутренней поверхности из алюминиевой фольги коэффициент конвективного теплообмена составил $\alpha_{в.к}$ = 3,55 Вт/м^{2}ºС, коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{в.л}$ =0,35 Вт/м^{2}ºС, сопротивление теплообмену у внутренней поверхности $R_в$ = 1/(3,55 + 0,35) = 0,256 м^{2}ºС/Вт.

Общее сопротивление теплопередаче стены с учетом отражающих свойств покрытия из алюминиевой фольги составило R_0 = 0,256 + + 0,36 + 0, 046 = 0,66 м^{2}ºС/Вт.

Температура на внутренней поверхности стены с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги определялось по формуле (5). При этом по формуле (1) находился средний коэффициент излучения помещения при коэффициенте излучения поверхности стены С = 0,5 Вт/(м^{2}ºК^4), покрытия C = 0,5 Вт/(м^{2}ºК^4) и бетонного пола C = 5,23 Вт/(м^{2}ºК^4), который равнялся $C_{ср}$ = 0,407 Вт/(м^{2}ºК^4).

После подстановки полученных теплофизических величин в формулу (5) с учетом $t_в$ = 16,9ºС и $t_н$ =-13,9ºС температура на внутренней поверхности составила $\tau_в$ = 6,74ºС.

Таким образом, сопоставляя полученную расчетом температуру $\tau_в$ = 6,74ºС с экспериментальной температурой $\tau_в$ = (7,2 + 6,9):2 = = 7,05ºС установлено, что расхождения составляют 0,31ºС или 4,3%, что позволяет рекомендовать предложенную методику для инженерно-практических расчетов.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований новые значения сопротивления теплоотдачи у внутренней ограждающей конструкции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги в помещении создают «тепловой эффект термоса», приводящий к повышению теплозащиты и снижению теплопотерь.

Предложенная новая методика расчета определения температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции в отличие от традиционного теплотехнического расчета позволяет учитывать на внутренней поверхности помещения изменение коэффициентов излучения в широком диапазоне от 0,5 до 5,76 Вт/(м^{2}К^4).

Библиографический список

1. Умнякова Н.П. Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией. Жилищное строительство, №1-2, 2014. - С.16-20.
2. Умнякова Н.П. Энергоресурсосбережение в строительстве – элемент концепции биосферной совместимости человека с окружающей средой / Биосферносовместимые города и поселения. Материалы международной конференции, 11-13 декабря 2012 г., Брянск. – С.56-64.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Изд-во «Энергия», 1973.
5. Богословский В.Н., Шилькрот Е.О. Расчет лучисто-конвективного теплообмена в помещении с учетом многократного отражения. Вопросы тепловлажностного и воздушного режимов кондиционирование микроклимата: Сборник трудов №68. – М.: МИСИ, 1970.
6. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. - 178 с.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЗАВОДСКОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Трекин Николай Николаевич
Начальник отдела конструктивных систем ОАО «ЦНИИПромзданий», г.Москва, доктор технических наук, профессор

Кодыш Эмиль Наумович
ОАО «ЦНИИПромзданий», г.Москва доктор технических наук, профессор

АННОТАЦИЯ

Разработаны новые конструктивные решения многоэтажных жилых зданий универсального назначения (элитного и массового), позволяющие из сборных железобетонных элементов заводского изготовления, в том числе многопустотных плит непрерывного формования, комплектовать каркас здания нового поколения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многоэтажные здания, Многопустотные плиты, Здание нового поколения, Живучесть каркасных зданий, Безопалубочное формование

В современном гражданском строительстве монолитный железобетон нашел широкое применение. Этому способствовали возможность получения «гибких» объемно-планировочных решений, характерных для элитных зданий, создание безбалочных перекрытий с гладкой потолочной поверхностью, обеспечение жестких узловых сопряжений всех элементов несущей системы, что способствует увеличению пространственной жесткости здания и в перспективе росту этажности.

Вместе с тем, монолитное домостроение требует больших сроков возведения зданий, что в климатических условиях большинства регионов страны приводит к необходимости производства работ при отрицательных температурах и использованию прогрева, специальных добавок и т.д.

Кроме того, выполнение технологически сложных и ответственных работ в условиях стройплощадки на открытом воздухе требует наличия рабочих высокой квалификации и усложняет контроль качества.

При сборном домостроении резко сокращаются сроки строительства, а заводское производство конструкций способствует повышению их качества.

В абсолютном большинстве конструктивных решений сборного домостроения используется стеновая и каркасно-балочная система. Использование стеновой системы существенно снижает «гибкость» объемно-планировочных решений, а в каркасно-балочных зданиях выступающие части ригелей (балок) портят эстетику интерьера, т.к. их ширина превосходит толщину перегородок.

Следует отметить, что существуют здания с безбалочными перекрытиями из сборных железобетонных конструкций. В качестве примеров можно привести конструкции каркаса с натяжением арматуры в построечных условиях и конструктивное решение «Куб-2,5» [3]. В первом случае, объединение сборных колонн и плит перекрытия осуществляется в процессе монтажа здания путем натяжения высокопрочной канатной арматуры, проходящей в двух взаимно перпендикулярных направлениях через отверстия в колоннах. Горизонтальные усилия при этом воспринимаются диафрагмами жесткости. Для того чтобы сборные элементы перекрытий могли служить упором при натяжении арматуры, зазоры между гранями плит и гранями колонн должны быть предварительно замоноличены, а бетон должен набрать необходи-

мую прочность. Образовавшийся «узел трения» между колоннами и перекрытиями воспринимает усилия от вертикальной нагрузки, что позволяет применять сборные железобетонные колонны без консолей, используя при монтаже инвентарные металлические столики. Напрягаемая арматура фиксируется специальными анкерами, выступающими за грань колонн. Осуществление данной системы требует высокого качества работ при бетонировании «узлов трения», инъецировании бетона в отверстия колонн, а также при натяжении и закреплении арматуры.

Конструктивная система «Куб-2,5» применялась в ряде регионов страны. Она состоит из колонн, как правило, сечением 40×40 см и плит с отверстием, которые «нанизываются» на колонны. Колонны и плиты имеют специальные металлические закладные детали, которые на сварке обеспечивают горизонтальное положение плит перекрытия. Плиты по периметру, за исключением пристенных, имеют шпонки и анкерные петли, которые соединяются между собой и после пропуска горизонтальных арматурных стержней бетонируются. Указанное конструктивное решение требует значительного количества ответственной сварки и швов замоноличивания.

Гладкие потолки возможно также получить в обычном каркасно-ригельном здании, организовав подрезку многопустотной плиты на опоре на высоту полки ригеля. Однако в этой зоне толщина межпустотного пространства у плит массового применения составляет всего 26 мм, что снижает ее несущую способность в зоне опирания. При снижении количества пустот, толщина межпустотного пространства увеличивается, но возрастает также расход бетона на плиту. Для восприятия поперечной силы в зоне опирания и при расчете по наклонному сечению требуется дополнительное, в том числе наклонное армирование.

В настоящее время наряду с предварительно напряженными многопустотными плитами, изготовленными в индивидуальных формах, широко применяется технология безопалубочного формования. Сущность этой технологии заключается в том, что изделия формуются на длинном (до 100 м) подогреваемом поддоне и армируются предварительно напряженными канатами. Формующая машина (экструдер) перемещается по рельсам, оставляя за собой непрерывную ленту с пустотами формованного железобетона, которую покрывают теплоизоляционным материалом, прогревают и после набора бетоном требуемой прочности разрезают на плиты нужной длины.

По сравнению с агрегатно-поточной технологией, при безопалубочном формовании себестоимость изделия снижается в среднем на 20% при высоком качестве изделия, что достигается уменьшением энергопотребления и металлоемкости изделий, а также полной механизацией процесса изготовления.

Данная технология позволяет получить многопустотные плиты с пустотами различной формы, для пролетов до 16 м при соответствующем увеличении толщины. Однако, при такой технологии предварительная установка закладных деталей, каркасов и сеток практически исключается.

Перечисленные особенности технологии не позволяли до сегодняшнего дня создавать в каркасных зданиях гладкие потолки без выступающих частей с плитами безопалубочного (непрерывного) формования [1, 4].

Авторами статьи были разработаны новые конструктивные решения многоэтажных жилых зданий универсального назначения (элитного и массового), позволяющие из сборных железобетонных элементов заводского изготовления, в том числе многопустотных плит непрерывного формования, комплектовать каркас здания нового поколения.

Многоэтажные здания (до 17 этажей) комплектуются из блок-секций, пример одной из которых показан на рис.1. Ограничение этажности было вызвано требованием МЧС техническими возможностями большинства пожарных машин.

Блок-секция выполнена по связевой конструктивной схеме. Пространственная жесткость здания обеспечивается сплошными (с проемами) диафрагмами жесткости.

Вертикальные несущие элементы выполнены в виде колонн-пилонов с предварительным размером сечения 300×800 мм и ориентацией большей стороной вдоль блок секции.

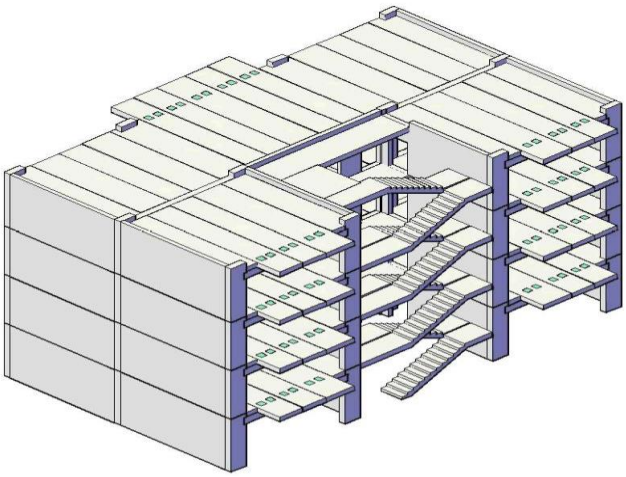


Рис.1. Блок-секция связевого каркаса

Перекрытия из многопустотных плит, уложенных по ригелям с обеспечением гладкой потолочной поверхности, разработана в двух вариантах:

1) плиты перекрытий многопустотные безопалубочного формования, с опиранием на предварительно напряженные ригели посредством так называемого шпоночного соединения (рис. 2).
2) плиты перекрытий многопустотные, изготовленные по стендовой технологии, с подрезкой у опор, с опиранием: по средней оси на полки ригеля таврового сечения (рис.3); по крайней оси – на ригели прямоугольного сечения (рис.4).

В многопустотных плитах массового применения высотой 220 мм, изготавливаемых в силовых формах, пустотообразователями (пуансонами) служат стандартные стальные трубы диаметром 159 мм с расстоянием между осями соседних труб 185 мм. Авторы предлагают пустотообразователи выполнять в форме треугольника, одна из сторон которого параллельна нижней грани плиты, а углы закруглены. Отрезая нижнюю (расширенную) часть треугольника, мы получаем зону опирания, достаточную для передачи опорной реакции.

Опирание плит на прямоугольные ригели у крайних осей (см.рис.4) вдоль наружных стен позволяет организовать лоджии или балконы, применяя более длинные плиты с консольными участками.

Рис. 2. Сопряжение ригеля с многопустотной плитой безопалубочного формования

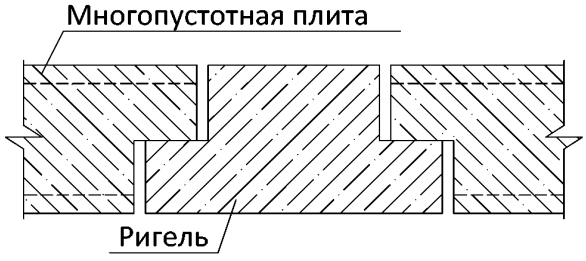


Рис.3. Сопряжение ригеля с многопустотной плитой по средней оси

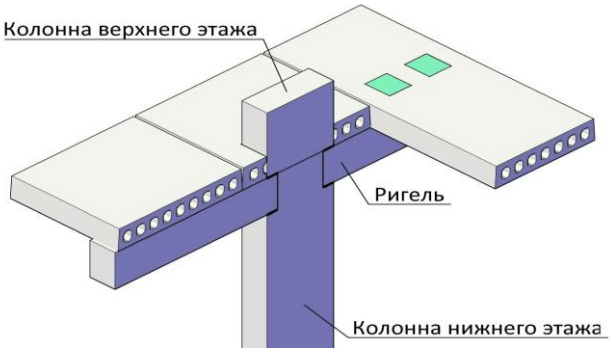


Рис.4. Опирание плит на ригель крайнего ряда

С целью повышения пространственной устойчивости здания был разработан экспериментальный образец нового технологичного рамного узла сопряжения ригеля с колонной (рис.5). Соединение арматурных стержней осуществляется комбинированно – винтовыми муфтами и методом штепсельного стыка. Этим была решена задача минимизации сварочных работ при монтаже конструкций, что значительно снижает трудоемкость и способствует повышению качества.

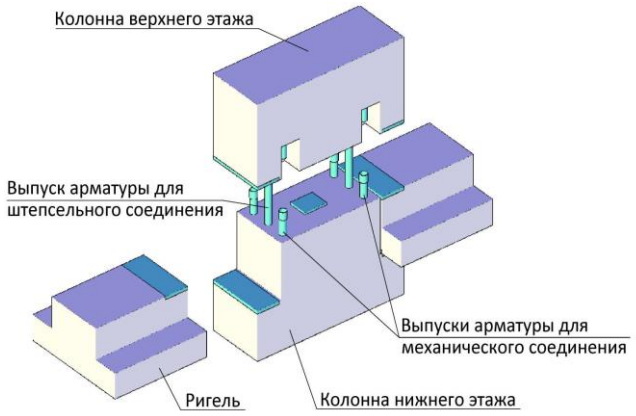


Рис.5. Узел сопряжения колонны-пилона с ригелем

При проектировании многоэтажных зданий различного назначения в обязательном порядке необходимо учитывать вероятность запроектного воздействия. К их числу можно отнести террористические акты, бытовые взрывы, механическое удаление опор и т.д. При разрушении какой-либо несущей конструкции изменяется схема работы конструктивной системы, происходит перегрузка сопряженных конструкций, и в добавок, ситуация усугубляется ударами падающих элементов, вследствие чего может возникнуть лавинообразное – «прогрессирующее» обрушение.

В применяемых сборных связевых каркасах все горизонтальные соединения несущих элементов в основном рассчитаны на нагрузки, возникающие при монтаже и при действии ветра. Соответственно эти соединения не всегда способны воспринять нагрузки, которые возникают при запроектных воздействиях. Поэтому в предлагаемом связевом каркасе были разработаны дополнительные мероприятия для обеспечения сопротивления прогрессирующему разрушению[2]. Например, часть плит перекрытия соединена между собой и с ригелем для исключения их возможного падения.

Для связевой конструктивной системы рассматривается обрушение части перекрытия вместе с удаленной колонной, а верхние же ярусы деформируются и зависают. Наличие дополнительных связей удлиняет время обрушения, что может позволить провести эвакуацию людей с участка обрушения перекрытий. Перекрытие нижележащего этажа возможно запроектировать с учетом дополнительной вертикальной нагрузки от обрушившегося перекрытия. При этом следует ограничивать зону обрушения по площади в плане, которая очерчена ячейками, примыкающими к рассматриваемой колонне.

Таким образом, для обеспечения требуемых схем деформирования конструкций в чрезвычайной ситуации предлагается комплекс мер, снижающих ущерб:

- объединение части сборных элементов податливыми связями, особенно плит перекрытия;
- контроль соединений ригелей между собой и с колоннами;
- повышение несущей способности всех закладных деталей особенно в связевых элементах и диафрагмах жесткости;
- установка вертикальных элементов жесткости высокой несущей способности и их системное расположение в плане с учетом возникающих усилий в деформированном состоянии.

Проведенные расчеты подтвердили, что устойчивость против прогрессирующего обрушения при рассмотренных воздействиях для связевых систем из сборного железобетона обеспечивается дополнительными конструктивными мероприятиями, при которых не изменяется конструктивная система. В этой связи целесообразно комплексно рассмотреть вопросы живучести каркасных зданий из сборного железобетона при запроектных воздействиях и разработать нормативный документ, в котором были бы определены характер и интенсивность чрезвычайных воздействий желательно в зависимости по степени ответственности зданий, конструктивных решений и использованных материалов.

Библиографический список

1. Блажко В.П. О применении многопустотных плит безопалубочного формования в строительстве панельных и каркасных зданий. - III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее», том II. – М., 2014. С.225-232.
2. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н. Обеспечение устойчивости сборных железобетонных связевых каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. - В сб.научных трудов «Предотвращение аварий зданий и сооружений». – М., 2009. С.142-145.
3. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом. – М.: Изд-во АСВ, 2009. 346с.
4. Николаев С.В. Панельные и каркасные здания нового поколения. - III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее», том II. – М., 2014. С.319-327.

АВТОРЫ НОМЕРА

Беккер Александр Тевьевич
Директор Инженерной школы ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

Билашенко Вячеслав Петрович
Старший научный сотрудник Института безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН), кандидат технических наук

Болгаров Сергей Петрович
Заместитель главного конструктора ОАО ЦКБ «Айсберг», г.Санкт-Петербург

Дульнев Андрей Иванович
Начальник лаборатории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доктор технических наук

Кантаржи Игорь Григорьевич
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», доктор технических наук, профессор

Ким Лев Владимирович
Заведующий Научно-конструкторской лабораторией проектирования морских инженерных сооружений ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», кандидат технических наук, доцент, советник РААСН

Кодыш Эмиль Наумович
ОАО «ЦНИИПромзданий», г.Москва, доктор технических наук, профессор

Кудинович Игорь Владиславович
Начальник отдела, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», кандидат технических наук

Кучин Николай Леонидович
Начальник комплексного отдела – руководитель ситуационно-кризисного центра, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», доктор физико-математических наук

Левачев Станислав Николаевич
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», кандидат технических наук, профессор

Малышев Сергей Павлович
Начальник отдела научно-исследовательских разработок ЯРБ – главный конструктор ОКР по реабилитации арктических морей от ядреных и радиационно-опасных подводных объектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург

Мордвинцев Константин Петрович
Кафедра «Гидротехническое строительство» ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», кандидат технических наук, профессор

Нестеров Александр Борисович
Отделение судовой и корабельной энергетики, ядерной и радиационной безопасности ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург

Рязанцева Ольга Владимировна
Научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Сотников Владимир Андреевич
Инженер Института безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН)

Спиридонов Александр Владимирович
Заведующий лабораторией «Энергосберегающие технологии в строительстве» НИИ строительной физики РААСН, Президент Ассоциации АПРОК, Лауреат Премии Правительства РФ, кандидат технических наук

Струев Вячеслав Петрович
Начальник отделения – заместитель генерального директора ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г.Санкт-Петербург, доктор физико-математических наук, профессор

Трекин Николай Николаевич
Начальник отдела конструктивных систем ОАО «ЦНИИПромзданий», г.Москва, доктор технических наук, профессор

Умнякова Нина Павловна
Заместитель директора НИИ строительной физики РААСН, кандидат технических наук

Шедько Сергей Владимирович
Начальник сектора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Шкляров Никита Вячеславович
Начальник сектора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Главный редактор	Еремин К.И.
Редактор	Шишкина Н.А.
Оператор компьютерной верстки	Дружинина Н.С.
Дизайнер	Куркина Т.О.
Фото на обложке	Нищета А.С.
Подготовлено к изданию	18.05.2015 г.

Выпуск	2 (15)
Основан	2011 г.
Издатели	АНО НИИ «Промбезопасность»
Регистрация	Св-во Эл №ФС77-45511 от 22.06.2011 г.
Адрес редакции	г.Магнитогорск, ул.Уральская, д.24
Интернет	www.наука-и-безопасность.рф
E-mail	redaktor@prom-b.com
Учредители	ООО «ВЕЛД»