


СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-97-107
УДК 623.828.8+621.039.68

И.В. Кудинович¹, Г.А. Макеев², В.В. Платонов¹ , А.Ж. Сутеева¹, Г.М. Шувалов¹

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² АО «ЦКБ «Айсберг», Санкт-Петербург, Россия

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГОБЛОКА ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Объект и цель научной работы. Объектом является модернизированный плавучий энергоблок (МПЭБ). Цель – обоснование ядерной и радиационной безопасности МПЭБ при внешних воздействиях.

Материалы и методы. Авторы применяют метод системного анализа.

Основные результаты. В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства (РМРС) и Ростехнадзора для обоснования безопасности ядерной энергетической установки (ЯЭУ) МПЭБ рассмотрены происшествия, связанные с внешними воздействиями на судно, сформирован перечень исходных событий с учетом вероятности их возникновения, определены конечные состояния МПЭБ и ЯЭУ на основе данных по масштабам разрушений корпусных конструкций и состояния оборудования, проведена оценка радиационных последствий.

Закключение. На основе разработанных в Крыловском центре методик в соответствии с требованиями нормативной базы обоснована ядерная и радиационная безопасность МПЭБ. При таране МПЭБ в район реакторного отсека ледоколом со скоростью более 6,5 уз возможна разгерметизация первого контура и сброс радиоактивной воды в морскую среду, что приведет к образованию пятна загрязнения, которое может достигать размеров 325 м. Наиболее тяжелыми по радиационным последствиям являются маловероятная (гипотетическая) запроектная авария, вызванная падением на МПЭБ среднемагистрального самолета, что приведет к разрушению всех защитных барьеров реакторной установки, опасному облучению людей на расстоянии до 3,8 км и необходимости эвакуации населения на расстоянии до 20 км.

Ключевые слова: атомная энергетическая установка, безопасность, судно, внешние воздействия.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-97-107
UDC 623.828.8+621.039.68

I.V. Kudinovich¹, G.A. Makeyev², V.V. Platonov¹ , A.J. Suteyeva¹, G.M. Shuvalov¹

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Central Design Bureau Aisberg JSC, St. Petersburg, Russia

SAFETY JUSTIFICATION FOR UPGRADED FLOATING NUCLEAR POWER PLANT REACTORS UNDER EXTERNAL EFFECTS

Object and purpose of research. This paper discusses an upgraded floating nuclear power plant (NPP) to justify its nuclear and radiation safety under external effects.

Materials and methods. The authors follow the methods of system analysis.

Main results. Following the requirements of Russian Maritime Register of Shipping (RS) and Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor) to the safety of upgraded floating NPP reactors, this study

Для цитирования: Кудинович И.В., Макеев Г.А., Платонов В.В., Сутеева А.Ж., Шувалов Г.М. Обоснование безопасности ядерной энергетической установки модернизированного плавучего энергоблока при внешних воздействиях. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 97–107.

For citations: Kudinovich I.V., Makeyev G.A., Platonov V.V., Suteyeva A.J., Shuvalov G.M. Safety justification for upgraded floating nuclear power plant reactors under external effects. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 97–107 (in Russian).

explored the incidents related to external loads on floating NPPs, drawing up the list of initiating events and their respective probabilities of occurrence, as well as predicting final states of floating NPPs and their reactors as per the data on hull and equipment damage, with the assessment of corresponding radiation hazards.

Conclusion. Nuclear and radiation safety justification of upgraded floating NPP was justified as per the regulations in force and Krylov State Research Centre procedures. If an icebreaker rams the reactor compartment of upgraded floating NPPs at the speed exceeding 6.5 knots, primary coolant circuit might leak, thus triggering a radioactive discharge into sea water that might create a contaminated spot up to 325 m in size. The worst-case scenario in terms of radiation hazard is a hypothetical (unlikely) off-design case of a medium-range airliner crash onto the upgraded floating NPP destroying all reactor protection barriers, so all humans within the range of 3.8 km might receive dangerous radiation doses and all population within the range of up to 20 km will have to be evacuated.

Keywords: nuclear power plant, safety, ship, external event.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Одной из основных задач при проектировании атомных объектов морской техники является обоснование безопасности в соответствии с требованиями нормативных документов. Данное обоснование включает анализ аварий, вызванных как внутренними причинами (отказы ядерной энергетической установки), так и внешними воздействиями на судно. Уровень безопасности атомного судна определяется величиной и вероятностью радиационных последствий, вызванных авариями.

Рекомендации МАГАТЭ и нормативного документа для атомных электростанций (АЭС) [1] к вероятности тяжелых аварий реактора для ядерных установок формулируются следующим образом:

- суммарная вероятность аварий с разрушением активной зоны при радиоактивном выбросе, не превышающем допустимого уровня (локализация радиоактивных продуктов), которая по всем последовательностям событий не должна превышать 10^{-5} событий на 1 реактор в год;
- недопустимый выброс радиоактивных продуктов должен быть исключен при всех исходных событиях и путях развития аварий, суммарная вероятность которых превосходит 10^{-7} на 1 реактор в год.

Атомное судно, как правило, эксплуатируется в отдаленных арктических малонаселенных районах, и количество радиоактивных элементов, накопленных в активной зоне судового реактора, на порядок меньше, чем в реакторе стационарной АЭС. В связи с этим при обосновании безопасности атомного судна принимаются следующие граничные значения вероятности (частоты) тяжелых аварий:

- серьезное повреждение активной зоны (в соответствии с [2] повреждение активной зоны относится к ядерной аварии) – 10^{-5} на 1 реактор в год;

- значительный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду – 10^{-6} на 1 реактор в год.

Внешние воздействия могут вызвать большие повреждения атомного судна и его ЯЭУ, что в конечном счете может привести к серьезным радиационным последствиям.

Анализ последствий аварий, вызванных внешними воздействиями, включает формирование перечня исходных событий, определение конечных состояний судна и ЯЭУ с учетом первичных последствий (зоны разрушений корпусных конструкций и помещений судна, отказы оборудования и систем, находящихся в разрушенных или затопленных помещениях) и сценариев развития аварий, оценку радиационных последствий.

Формирование перечня исходных событий проектных и запроектных аварий производится в соответствии с рекомендациями нормативного документа [3], а также с учетом вероятности их возникновения.

К *проектным авариям* относятся происшествия, связанные с нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации реакторной установки (РУ), для которых проектом предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие с учетом единичного отказа ограничения их последствий [2].

К *запроектным авариям* относятся происшествия, связанные с нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации, для предотвращения опасного развития которых проектом не предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие ограничения их последствий [4].

В соответствии с нормативным документом [5], при анализе внешних воздействий на ядерно и радиационно опасные объекты в проектных авариях допускается не учитывать природные явления, вероятность возникновения которых в течение года не превышает 10^{-4} , и факторы техногенного происхождения, для которых вероятность реализации в течение года меньше 10^{-6} . Таким образом, аварии,

вызванные внешними исходными событиями с вероятностью (частотой) менее 10^{-6} 1/год, могут рассматриваться как запроектные.

Определение объемов повреждений корпусных конструкций судна при внешних воздействиях производится при помощи методик, разработанных в Крыловском центре [6–8]. Для определения масштабов радиационных последствий аварий с выбросом радиоактивных продуктов деления из активной зоны в атмосферу используется методика [9], разработанная на основе гауссовой модели рассеяния радиоактивных веществ в атмосфере с учетом класса устойчивости атмосферы и скорости ветра.

Для анализа радиационных последствий аварий с выходом радионуклидов в морскую среду используется методика [10], в соответствии с которой определяются границы зон акваторий, где концентрация радионуклидов в морской воде превышает контрольные значения, определяемые требованиями радиационной гигиены (значения контрольных концентраций принимались для консервативного рациона потребления морепродуктов).

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с обоснованием ядерной и радиационной безопасности модернизированного плавучего энергоблока при происшествиях, связанных с внешними воздействиями.

Модернизированный плавучий энергоблок

Upgraded floating NPP

Модернизированный плавучий энергоблок (рис. 1) представляет собой несамостоятельное стоечное судно, спроектированное на класс PC – KE⊕⊗AUT2-ICS ⊗ Berth-connected ship (S) floating power plant. Основные характеристики МПЭБ представлены в табл. 1. Усиления корпуса соответствуют ледовому классу Arc5 [11]. В соответствии с классификацией РМРС на МПЭБ распространяются нормативные требования по ядерной и радиационной безопасности для судов с ЯЭУ.

В состав ЯЭУ МПЭБ входят две РУ РИТМ-200С с тепловой мощностью 198 МВт и две паротурбинные установки с турбогенераторами, обеспе-

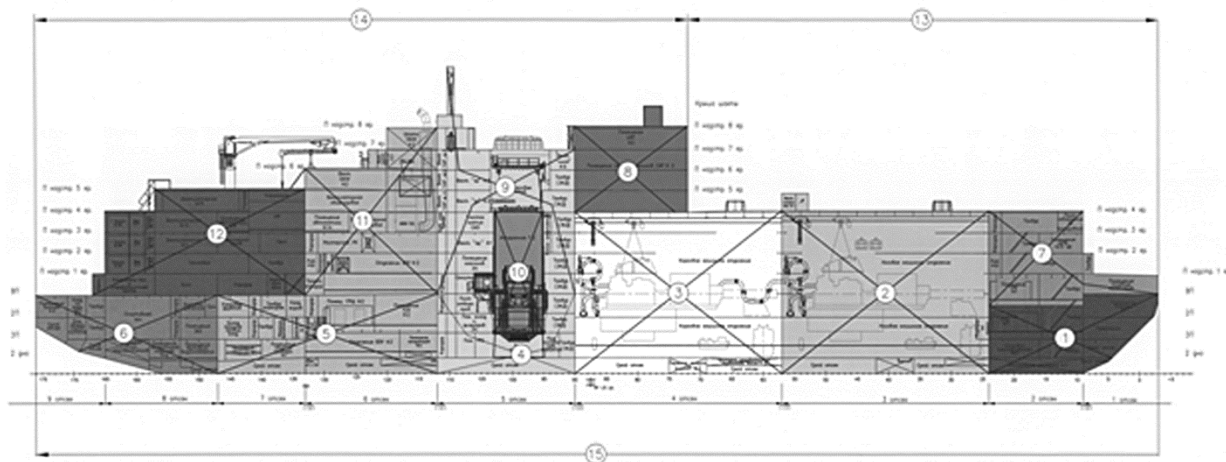


Рис. 1. Модернизированный плавучий энергоблок проекта 20871

Fig. 1. Project 20871 upgraded floating NPP

Таблица 1. Основные характеристики модернизированного плавучего энергоблока

Table 1. Main parameters of upgraded floating NPP

Характеристика	Величина
Водоизмещение, т	21 260
Длина по конструктивной ватерлинии, м	138,8
Ширина по конструктивной ватерлинии, м	30
Высота борта, м	10,2
Осадка, м	5,5



Рис. 2. Модернизированный плавучий энергоблок в месте базирования

Fig. 2. Upgraded floating NPP at its base

чивающими электрическую мощность на клеммах генераторов по 58 МВт. МПЭБ выдает в береговые сети 106 МВт электроэнергии.

РУ РИТМ-200С разработана на базе РУ РИТМ-200 для универсального атомного ледокола (УАЛ) с увеличенной мощностью. Каждая реакторная установка размещена в защитной оболочке (ЗО), рассчитанной на избыточное внутреннее давление 0,4 МПа. МПЭБ оборудован системой затопления ЗО, срабатывающей непосредственно от превышения предельного значения давления забортной воды. Система защищает ЗО от разрушения внешним гидростатическим давлением воды в случае затопления МПЭБ на глубокой воде, выравнивая давление внутри и снаружи ЗО.

В качестве резервных источников электроэнергии на МПЭБ предусмотрено два резервных дизель-генератора (РДГ) по 2610 кВт каждый, а в качестве аварийных источников электроэнергии – три аварийных дизель-генератора (АДГ) мощностью по 536 кВт.

Согласно требованиям РМРС [12] в районе реакторного отсека (РО) МПЭБ предусмотрена конструктивная защита, которая предотвращает повреждение защитного ограждения, окружающего ЗО реакторной установки, при столкновении с другим судном.

Реакторная установка МПЭБ оснащена традиционными для атомных судов системами безопасности, включая систему аварийного расхолаживания (САР), состоящую из двух каналов расхолаживания активного принципа действия и одного пассивного канала расхолаживания. Первый активный канал расхолаживания производит охлаждение активной зоны через парогенераторы вторым контуром запасом воды из уравнильных цистерн при помощи аварийных питательных насосов. Второй канал САР охлаждает активную зону третьим кон-

туром через теплообменники первого-третьего контуров. При отсутствии резервных и аварийных источников электропитания активная зона охлаждается пассивным каналом САР, при помощи которого тепло отводится путем выпаривания в атмосферу запасов воды из цистерн аварийного расхолаживания (ЦАР).

МПЭБ проекта 20871 предназначены для энергообеспечения Баимского горно-обогатительного комбината [11]. Размещение четырех МПЭБ планируется на юго-западном берегу Чаунской губы (рис. 2). В состав береговых сооружений войдут трансформаторная подстанция и внутримплощадочные линии электроснабжения, комплекс обслуживающих сооружений и техническая зона.

Недалеко от площадки размещения МПЭБ, в районе мыса Наглеингын, расположатся универсальный морской терминал, предназначенный для доставки грузов и вывоза продукции Баимского медно- и золоторудного месторождения, а также вахтовый поселок. Терминал включает порт с буксирами-кантовщиками, позволяющий принимать суда ледового класса, и береговую инфраструктуру, состоящую из административных и хозяйственных сооружений, вертолетной площадки, складов запаса дизельного топлива.

Проектные и запроектные аварии

Design and off-design emergencies

При разработке перечня исходных событий учитывалась модель эксплуатации МПЭБ, особенность которой заключается в том, что раз в пять лет необходимо осуществлять его транспортировку по Северному морскому пути (СМП) с места базирования на завод для перегрузки активной зоны и проведения ремонтных работ. При буксировке МПЭБ обе РУ

Таблица 2. Перечень исходных событий проектных и запроектных аварий модернизированных плавучих энергоблоков по внешним причинам

Table 2. List of external initiating events for design and off-design accidents with upgraded floating NPPs

Исходное событие	Характеристики (параметры) исходного события	Исходное состояние МПЭБ	Возможные последствия
<i>Проектные аварии</i>			
1. Навигационные аварии			
1.1. Столкновение с другим судном	Таран МПЭБ ледоколом или арктическим судном со скоростью до 5 уз (таран под прямым углом в район реакторного отсека)	Транспортировка МПЭБ методом буксировки. Реакторы заглушены. РУ полностью расхоложены	Повреждение корпусных конструкций МПЭБ. Повреждения помещений МПЭБ
1.2. Посадка на мель	Посадка на мягкий грунт	Транспортировка МПЭБ методом буксировки. Реакторы заглушены. РУ полностью расхоложены	Нарушение общей прочности корпуса
1.3. Затопление МПЭБ	На мелкой воде (уровень воды не выше верхней палубы)	МПЭБ находится в месте базирования. Реакторы заглушены час назад. РУ в режиме расхоложивания	Нарушение охлаждения РУ в процессе расхоложивания реакторов (ЗО не затоплены)
2. Внешние взрывы			
	Источники взрыва: хранилище дизельного топлива на береговой площадке; хранилище топлива и взрывчатые вещества на территории морского терминала	МПЭБ штатно закреплен в месте базирования. РУ работают на номинальном уровне мощности	Обрыв закрепляющих устройств. Повреждение корпусных конструкций МПЭБ
3. Падение вертолета			
	Вертолет типа Ми-8 (масса 12 т). Высота падения – 50 м. Место падения – район реакторного отсека МПЭБ	МПЭБ штатно закреплен в месте базирования. РУ работают на номинальном уровне мощности	Разрушение корпусных конструкций МПЭБ
<i>Запроектные аварии</i>			
Столкновение	Столкновение МПЭБ с УАЛ со скоростью выше 5 уз	Транспортировка МПЭБ методом буксировки. Реакторы заглушены. РУ полностью расхоложены	Повреждение корпусных конструкций МПЭБ. Повреждение защитного ограждения и помещений МПЭБ
Посадка на мель	Посадка на скалистый грунт	Транспортировка МПЭБ методом буксировки. Реакторы заглушены. РУ полностью расхоложены	Повреждение корпусных конструкций МПЭБ. Повреждение емкостей с жидкими радиоактивными отходами
Затопление МПЭБ	На глубокой воде (глубина 250 м)	Транспортировка МПЭБ методом буксировки. Реакторы заглушены. РУ полностью расхоложены	Разрушение корпусных конструкций МПЭБ

выводятся из действия и расхолаживаются, электро-снабжение МПЭБ обеспечивается от РДГ. Таким образом, для МПЭБ необходимо учитывать навигационные аварии: как при транспортировке, так и из-за внешних воздействий в пункте базирования.

Технические решения, заложенные в проект МПЭБ, выполнены в соответствии с нормами и правилами РМРС [13], которые учитывают волновые, ветровые и ледовые нагрузки, поэтому природные воздействия в качестве исходных событий проектных и запроектных аварий не рассматривались.

В табл. 2 представлен перечень исходных событий проектных и запроектных аварий, вызванных внешними воздействиями на МПЭБ.

Столкновения

Столкновение судов возможно как в результате нарушения правил судовождения, так и при потере управляемости судов вследствие технических неисправностей.

На основании статистических данных по столкновениям судов мирового флота, вероятность столкновения составляет $5 \cdot 10^{-2}$ для судна в год. При этом вероятность получения серьезных повреждений включая водотечные пробойны – $7 \cdot 10^{-4}$ для судна в год, а вероятность гибели судна в результате столкновения – $6 \cdot 10^{-5}$ в год [7, 14]. Указанные значения завышены для арктических судов, т.к. не учиты-

вают характер плавания по СМП с относительно слабым судоходством (по данным [14] за период эксплуатации атомного флота с 1996 по 2021 г. имел место только один случай столкновения судов без нарушения прочности корпусных конструкций).

В соответствии с требованиями РМРС [12] в районе РО атомного судна должна быть предусмотрена конструктивная защита, обеспечивающая поглощение энергии столкновения с другим судном и предотвращающая повреждение защитного ограждения. В качестве критерия отнесения исходного события к проектным или запроектным авариям, связанного со столкновением атомного судна, можно использовать значение критической скорости таранящего судна. Под критической скоростью понимается скорость таранящего судна, при которой происходит повреждение защитных барьеров: конструктивной защиты, границы защитного ограждения, защитной оболочки. Таран судна со скоростью меньше критической, когда защитное ограждение не повреждается (рис. 3), относится к проектным авариям, а с большей скоростью – к запроектным.

В качестве судна, таранящего МПЭБ при транспортировке по СМП, рассматривался УАЛ проекта 22220, а в качестве таранящего судна в месте базирования – буксир с острой носовой оконечностью. Исходя из консервативного подхода принимался самый неблагоприятный вариант столкно-

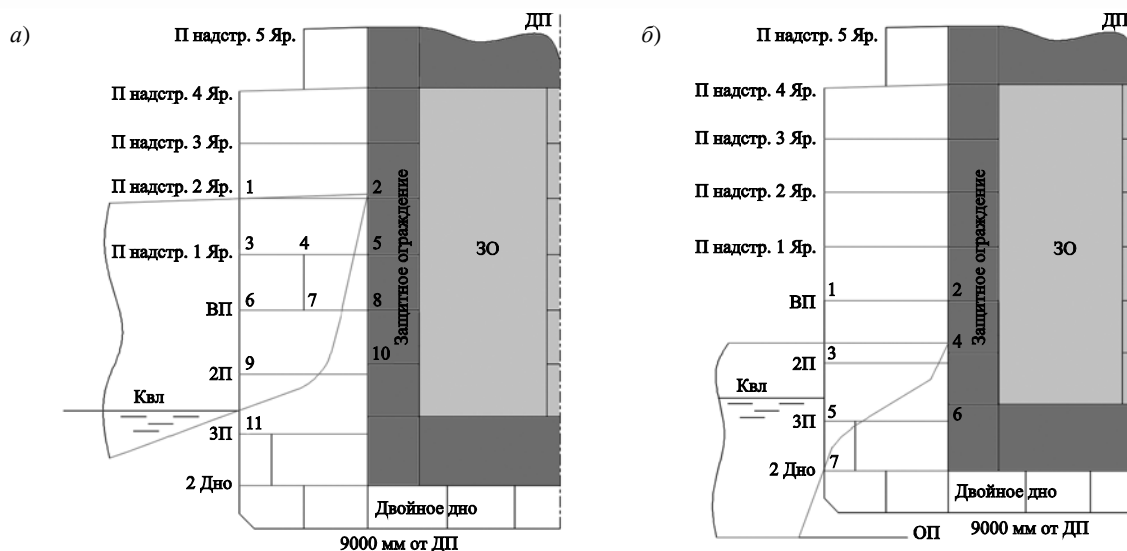


Рис. 3. Проникновение форштевня таранящего судна в бортовые перекрытия модернизированного плавучего энергоблока при таране в район реакторного отсека с критической скоростью: а) универсальный атомный ледокол проекта 22220; б) буксир

Fig. 3. Stem penetration into side grillage of upgraded floating NPPs in case of reactor compartment ramming (at critical speed) of a) Project 22220 universal nuclear icebreaker; b) a tug

вения – удар таранящего судна носовой оконечностью под прямым углом в борт МПЭБ в районе реакторного отсека.

Результаты расчетов показали, что значения критической скорости при таране УАЛ проекта 22220 и буксиром составляют 5 уз и 7,1 уз соответственно. При движении буксира в месте базирования МПЭБ его скорость не может превысить критического значения.

В случае тарана МПЭБ ледоколом со скоростью до 5 уз защитная оболочка не повреждается, радиационные последствия исключены. Выход из строя оборудования и коммуникаций, расположенных в поврежденных помещениях, не приводит к потере функций систем безопасности вследствие реализации при проектировании принципа резервирования (оборудование, важное для безопасности, дублировано и размещено побортно).

В случае тарана МПЭБ ледоколом со скоростью больше 6,5 уз проникновение носовой оконечности таранящего судна может достигать 30, что приведет к ее повреждению и разгерметизации первого контура одной РУ (со стороны поврежденного борта).

Учитывая, что МПЭБ транспортируется с полностью расхолаженными РУ, повреждения активной зоны не произойдет, однако возможен сброс теплоносителя первого контура в морскую воду. Оценка радиационных последствий выхода радионуклидов в морскую воду показала, что радиус пятна загрязнения, где концентрация радионуклидов превышает контрольные значения, не более 325 м.

Посадка на мель

В месте базирования раскрепление МПЭБ обеспечивает его надежное удержание при экстремальных внешних воздействиях повторяемостью 1 раз в 10 000 лет, поэтому посадка МПЭБ на мель в пункте базирования при обрыве швартовых штагов не рассматривается.

Согласно статистическим данным [15] в среднем в год в результате посадки на мель гибнет около 15 судов, вероятность гибели судна по этой причине составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ в год. С учетом усреднения времени транспортировки МПЭБ по его полному жизненному циклу вероятность гибели МПЭБ (приведенная к одному году) при посадке на мель не превышает 10^{-6} в год. Посадка на мель рассматривается в качестве исходного события проектной аварии в соответствии с рекомендациями нормативного документа [3].

В период морской буксировки посадка МПЭБ на мягкий грунт наиболее вероятна в мелководных

морях (Восточно-Сибирское море, море Лаптевых, Карское море), где уровень прилива 0,1÷0,8 м. При посадке на мягкий грунт МПЭБ не получает внешних повреждений. Расчеты показали, что общая прочность корпуса сохраняется при «обсыхании» до 2,3 м, таким образом, можно сделать вывод о достаточной прочности корпуса МПЭБ в случае аварии с посадкой на мель и последующим «обсыханием».

Посадка МПЭБ на скалистый грунт, характерный для прибрежной линии Баренцева моря, маловероятна, т.к. в этом районе буксировка МПЭБ по мелководью не осуществляется, поэтому в качестве исходного события рассматривается удар о подводный камень на волнении. Расчет повреждений днищевых конструкций реакторного отсека при посадке МПЭБ на подводный камень с учетом вертикального перемещения МПЭБ на волнении показал, что при волнении более 6 баллов заглужение камня может привести к разрушению цистерн хранения жидких радиоактивных отходов (ЖРО), которые относятся к низкоактивным ЖРО, поэтому их сброс в забортное пространство не приводит к недопустимому радиоактивному загрязнению.

Затопление

Затопление МПЭБ на мелкой воде возможно в месте базирования при взрыве на борту с повреждением корпуса ниже ватерлинии и распространении воды в соседние отсеки через поврежденные переборки.

В результате затопления МПЭБ на мелкой воде происходит потеря его плавучести и погружение до верхней палубы. В этом случае 30 остаются незатопленными, а помещения с оборудованием ЯЭУ, расположенные ниже ВП, затоплены водой. Электроснабжение МПЭБ обеспечивается АДГ, которые размещены в надстройке и не затапливаются.

При поступлении забортной воды в отсеки, где размещается оборудование ЯЭУ, прежде всего могут выйти из строя электронасосы, расположенные на втором дне (главные конденсатные, питательные и циркуляционные насосы, конденсатный и циркуляционный насосы технологического конденсатора, насос четвертого контура). В результате выходят из строя активные каналы САР, расхолаживание РУ осуществляется пассивными каналами САР. Запас воды в ЦАР достаточен для работы пассивных каналов САР в течение 8 часов, что обеспечивает снижение давления и температуры теплоносителя первого контура до значений, гарантирующих отсутствие разгерметизации первого контура.

В соответствии с требованиями РМРС [13] непотопляемость МПЭБ должна обеспечиваться

при затоплении любых двух смежных отсеков для всех спецификационных случаев нагрузки. Поэтому затопление МПЭБ в принципе возможно при затоплении не менее 3–4 отсеков в результате тарана его другим судном под острым углом или при столкновении с подводным препятствием с образованием пробоины большой протяженности ниже ватерлинии. Вероятность затопления МПЭБ при морской транспортировке, приведенная к году жизненного цикла, оценивается величиной $5 \cdot 10^{-7}$ [15].

Арктические моря в основном мелководны, наибольшая глубина на трассе СМП составляет 250 м в проливе Вилькицкого [16].

При затоплении МПЭБ с погружением на ровном киле скорость погружения может достигать 9 м/с. В процессе погружения МПЭБ давление в 3О будет выравниваться с забортным за счет поступления забортной воды через систему затопления 3О, что предотвращает ее разрушение под воздействием перепада внутреннего и внешнего давлений. При ударе днищем о грунт на глубинах до 250 м происходит смятие двойного дна, но повреждений 3О и цистерн ЖРО не происходит.

При погружении с дифферентом 90° скорость МПЭБ достигает 12,7 м/с в момент удара оконечностью о грунт на глубине 250 м. При этом разрушение корпусных конструкций распространяется до 3О, однако повреждений 3О не происходит.

Внешние взрывы

К потенциально взрывоопасным объектам на береговой площадке относится склад топлива резервной дизельной установки [11], а на территории универсального морского терминала – резервуары с дизельным топливом, склад взрывоопасных грузов (взрывчатые вещества для проведения взрывных работ на Баймском месторождении).

В качестве критериев стойкости МПЭБ к внешним взрывам приняты значения избыточного давления на корпус МПЭБ, при которых обеспечивается прочность корпусных конструкций и системы раскрепления. Предельное значение избыточного давления, которое выдерживают корпусные конструкции МПЭБ, составляет 55 кПа, а динамическая нагрузка на систему раскрепления, вызванная воздействием взрывной ударной волны, составляет 6,85 МН.

Оценка интенсивности взрывной волны при взрыве на берегу, выполненная в соответствии с рекомендациями [17], показала, что прочность корпуса МПЭБ и системы раскрепления при взрывах внешнего источника обеспечена, РУ остаются

в работоспособном состоянии, радиационных последствий нет.

Падение летательного аппарата

На МПЭБ не предусмотрены базирование и прием вертолета, однако на территории универсального морского терминала на расстоянии 1,2 км от МПЭБ будет располагаться вертолетная площадка. Кроме того, возможно падение вертолета на МПЭБ при проведении аварийно-спасательных операций в случае навигационных аварий при транспортировке МПЭБ.

Аварийная ситуация, связанная с падением вертолета в районе РО, рассматривалась для случая падения вертолета типа Ми-8 с высоты 50 м. В районе РО конструктивная защита МПЭБ обеспечивает требуемый уровень защищенности. Деформации элементов корпусных конструкций не превышают допустимых пределов, возможность взрыва в помещениях ЯЭУ вследствие проникновения авиационного топлива исключена. Радиационных последствий нет.

Над районом размещения МПЭБ проходят трассы воздушных судов, кроме того, в 80 км от мыса Найгленгын размещается аэропорт г. Певека, принимающий среднемагистральные самолеты. Вероятность поражения МПЭБ при падении самолета в течение года имеет порядок 10^{-9} , что согласуется с данными, представленными в [18].

Падение среднемагистрального самолета на МПЭБ с возможным последующим взрывом авиатоплива приведет к разрушению всех защитных барьеров МПЭБ, однако вероятность данного события практически равна нулю. Указанная запроектная авария принята в качестве гипотетической для оценки максимально возможных радиационных последствий при внешнем воздействии на МПЭБ.

В результате воздействия факела выброса радиоактивных веществ дозы облучения населения, находящегося на расстоянии до 3,8 км от МПЭБ, могут превысить пороговые значения, при которых проявляются клинически определяемые детерминированные эффекты [19]. После прохождения факела основным фактором радиационного воздействия становится излучение от осевших на поверхности радионуклидов. В этом случае для предотвращения переоблучения может потребоваться эвакуация населения на расстояние до 20 км от места аварии.

Выводы

Conclusion

Анализ безопасности МПЭБ при внешних воздействиях позволяет сделать следующие выводы.

Ядерная и радиационная безопасность МПЭБ обеспечена в случае всех проектных аварий, к которым относятся: таран МПЭБ другим судном, скорость которого меньше критической; посадка на мель (удар о подводный камень, посадка на мягкий грунт); внешние взрывы на береговой площадке; падение вертолета.

При таране МПЭБ в район реакторного отсека ледоколом со скоростью более 6,5 уз возможна разгерметизация первого контура и сброс радиоактивной воды в морскую среду, что приведет к образованию пятна загрязнения, которое может достигать размеров 325 м.

Наиболее тяжелыми по радиационным последствиям являются маловероятная (гипотетическая) запроектная авария, вызванная падением на МПЭБ среднемагистрального самолета. Это приведет к разрушению всех защитных барьеров реакторной установки, опасному облучению людей на расстоянии до 3,8 км и необходимости эвакуации населения на расстояние до 20 км.

Список использованной литературы

1. Учет внешних событий, вызванных деятельностью человека при проектировании атомных станций: Руководство по безопасности № 50-SG-D5 (Rev.1). Вена: МАГАТЭ, 1983.
2. Правила ядерной безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами: НП-029-17: утв. приказом Ростехнадзора от 04.09.2017 № 352. Москва, 2017. 39 с.
3. Требования к отчету по обоснованию безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами: НП-023-20: утв. приказом Федер. службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.06.2020 № 236. Москва, 2020. 91 с.
4. Общие положения обеспечения безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами: НП-022-17: утв. приказом Федер. службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 04.09.2017 № 351. Москва, 2017. 51 с.
5. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии: НП-064-17: утв. приказом Федер. службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.06.2017 № 217. Москва, 2018. 70 с.
6. *Нестеров А.Б.* Исследование эффективности конструктивной бортовой защиты при аварийном столкновении судов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. Вып. 40. Ленинград, 1984. С. 46–52.
7. *Нестеров А.Б.* Решение проблем аварийной прочности и экологической безопасности судов для морской транспортировки токсичных грузов за счет совершенствования судокорпусных конструкций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.01 / *А.Б. Нестеров*; Крыловский государственный научный центр. Санкт-Петербург, 2013. 43 с.
8. *Дульнев А.И.* Прочность и сотрясение судовых конструкций в условиях аварийного падения вертолета на палубу // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. Вып. 21(305). С. 84–102.
9. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу: Технический документ МПА-98: утв. Приказом Министра РФ по атомной энергии 30.12.1998. // Гарант: [сайт]. Москва, 2023. URL: <https://base.garant.ru/70798820> (дата обращения: 21.04.2023).
10. Моделирование радиационного воздействия атомных объектов морской техники в проблеме безопасности морской среды и человека: монография / *М.Н. Ганул, Н.Л. Кучин, Ю.А. Платовских, И.В. Сергеев, В.П. Струев*. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2003. 120 с.
11. *Владимиров А.А., Макеев Г.А.* Опыт и перспективы создания плавучих энергетических блоков для освоения и развития территорий Российского Севера и Дальнего Востока // Судостроение. 2021. № 4(857). С. 56–60. DOI: 10.54068/00394580-2021-4-56.
12. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений: НД № 2-020101-112 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2018. 176 с.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть V. Деление на отсеки: НД № 2-020101-138 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2021. 59 с.
14. Анализ информации по авариям ледоколов и транспортных судов с атомными энергетическими установками / *С.П. Болгаров, В.М. Воробьев, А.В. Воронцов, Р.А. Иванов* // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2009. Вып. 45(329). С. 111–128.
15. *Кацман Ф.М., Еришов А.А.* Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 5. С. 82–84.
16. *Думанская И.О.* Ледовые условия морей Азиатской части России / ФГБУ «Гидрометцентр России». Москва, 2017. 637 с.
17. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия: РБ Г-05-039-96: утв. Постановлением

- Госатомнадзора России 31.12.1996 № 100. Москва, 2000. 29 с.
18. *Костиков В.А., Смольников В.Л., Баранаев Ю.Д., Викторов А.Н., Владыков Г.М., Долгов В.В., Шведенко И.М.* Определение вероятности падения воздушного судна на АЭС // Атомная энергия. 1993. Т. 74. Вып. 1. С. 53–58.
 19. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : СанПиН 2.6.1.2523-09 : утв. Постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47. Москва, 2000. 222 с.
 9. Calculation of radiation environment and expected radiation doses for population in case of short-term radioactive discharges into the atmosphere. Technical Document MPA-98. Adopted by the Directive of the Minister of Nuclear Energy of the Russian Federation on 30.12.1998 // Garant : [site]. Moscow, 2023. URL: <https://base.garant.ru/70798820> (Accessed: 21.04.2023). (*in Russian*).
 10. Simulation of radiation impact from marine nuclear facilities in the problem of human and water medium safety : Monograph / *M.N. Ganul, N.L. Kuchin, Yu.A. Platovskih, I.V. Sergeev, V.P. Struev*. St. Petersburg : St. Petersburg State University, 2003. 120 p. (*in Russian*).
 11. *Vladimirov A.A., Makeev G.A.* State of the art and prospects in development of nuclear power plants for development of the North and Far East of Russia // *Sudostroyeniye*. 2021. No. 4(857). P. 56–60. DOI: 10.54068/00394580-2021-4-56 (*in Russian*).
 12. RS Rules for Classification and Construction of Nuclear Ships and Floating Facilities ND No. 2-020101-112 (2018 ed.). St. Petersburg, 2018. 176 p. (*in Russian*).
 13. RS Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Pt. V. ND 2-020101-174 (2021 ed.). St. Petersburg, 2021. 59 p. (*in Russian*).
 14. Analysis of data on emergencies with nuclear icebreakers and carrier ships / *S.P. Bolgarov, V.M. Vorobyev, A.V. Vorontsov, R.A. Ivanov* // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2009. No. 45(386). P. 111–128 (*in Russian*).
 15. *Katsman F.M., Yershov A.A.* Accidents with sea-going ships and ship traffic safety challenges // *Transport Rossiyskoy Federatsii (Rostransport)*. 2006. No. 5. P. 82–84 (*in Russian*).
 16. *Dumanskaya I.O.* Ice conditions in Asian seas of Russia. Moscow : Obninsk : IG-SOTsIN, 2017. 637 p. (*in Russian*).
 17. Regulatory Document RB G-05-039-96. Guidelines on hazard analysis of emergency explosions and determination of their mechanical impact parameters. Adopted by Gosatomnadzor of Russia Directive No. 100 dt. 31.12.1996. Moscow, 2000. 29 p. (*in Russian*).
 18. *Kostikov V.A., Smol'nikov V.L., Baranaev Yu.D., Viktorov A.N., Vladykov G.M., Dolgov V.V., Shvedenko I.M.* Determination of the probability of an aircraft crashing into a nuclear power plant // *Atomic Energy*. 1993. V. 74. Iss. 1. pp. 53–58 (*in Russian*).
 19. Standards of radiation safety (NRB-99/2009): SanPiN 2.6.1.2523-09: approved by the Chief Sanitary Inspector of the Russian Federation Directive No. 47 dt. 07.07.2009. Moscow, 2000, 222 p. (*in Russian*).

References

1. External Man-Induced Events in Relation to Nuclear Power Plant Design. A Safety Guide. No. 50-SG-D5 (Rev. 1), Vienna, IAEA, 1983.
2. Regulatory Document NP-029-17. Nuclear safety rules for ships and other vessels with nuclear reactors. Adopted by Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), Directive No. 352 dt. 04.09.2017. Moscow, 2017. 39 p. (*in Russian*).
3. Regulatory Document NP-023-20. Requirements to safety justification report for ships and other vessels with nuclear reactors. Adopted by Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), Directive No. 236 dt. 22.06.2020. Moscow, 2020. 91 p. (*in Russian*).
4. Regulatory Document NP-022-17. Safety of ships and other vessels with nuclear reactors. General provisions. Adopted by Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), Directive No. 351 dt. 04.09.2017. Moscow, 2017. 51 p. (*in Russian*).
5. Regulatory Document NP-064-17. Natural and man-made external effects in relation to nuclear energy consumers. Adopted by Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), Directive No. 217 dt. 23.06.2017. Moscow, 2018. 70 p. (*in Russian*).
6. *Nesterov A.B.* Efficiency of structural protection of ship sides in case of emergency collisions // *Shipbuilding Matters. Ship Design Series*. 1984. Vol. 40. P. 46–52 (*in Russian*).
7. *Nesterov A.B.* Enhancing emergency strength and environmental safety of toxic cargo carriers by improving their hull structures : Author's Dr. Sci. (Eng.) abstract : 05.08.01 / *A.B. Nesterov*; Krylov State Research Centre. St. Petersburg, 2013. 43 p. (*in Russian*).
8. *Dulnev A.I.* Strength and concussions of ship structures due to helicopter crash landing on deck // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2005. Vol. 21(305). P. 84–102 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Кудинович Игорь Владиславович, д.т.н., доцент, начальник отдела – заместитель начальника отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-06. E-mail: i_kudinovich@ksrc.ru.

Макеев Глеб Анатольевич, к.т.н., главный конструктор проекта. АО «ЦКБ «Айсберг». Адрес: 199034, Россия, Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., д. 36. Тел.: +7 (812) 667-30-42. E-mail: gleb@iceberg.sp.ru.

Платонов Виктор Викторович, к.ф.-м.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-06. E-mail: vv_platonov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9639-0917>.

Сутеева Аделина Жанатовна, ведущий инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-33. E-mail: A_Suteeva@ksrc.ru.

Шувалов Глеб Михайлович, к.ф.-м.н., инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-59. E-mail: shuvalov.gleb@gmail.com.

About the authors

Igor V. Kudinovich, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department – Deputy Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-06. E-mail: i_kudinovich@ksrc.ru.

Gleb A. Makeyev, Cand. Sci. (Eng.), Project Chief Designer, Central Design Bureau Aisberg JSC. Address: 36, Bolshoy pr. of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, Russia, post code 199034. Tel.: +7 (812) 667-30-42. E-mail: gleb@iceberg.sp.ru.

Viktor V. Platonov, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-06. E-mail: vv_platonov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9639-0917>.

Adelina J. Suteyeva, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-33. E-mail: A_Suteeva@ksrc.ru.

Gleb M. Shuvalov, Cand. Sci. (Phys.&Math.), 1st Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-59. E-mail: shuvalov.gleb@gmail.com.

Поступила / Received: 26.12.22
Принята в печать / Accepted: 01.06.23
© Коллектив авторов, 2023