

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГООБЛОКА ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ

В. А. Коршунов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

И. В. Кудинович

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

А. А. Родионов

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

А. Ж. Сутеева

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Г. М. Шувалов

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 октября 2022 г.

Рассмотрена навигационная авария, связанная с тараном плавучего энергоблока другим судном. Представлен подход к определению последствий столкновения с использованием метода конечных элементов: разработана расчетная схема метода конечных элементов для моделирования разрушения корпусных конструкций судна, определена энергоемкость корпусных конструкций судна при таране, рассчитаны критические скорости таранящих судов. Показан высокий уровень безопасности модернизированного плавучего энергоблока в случае навигационной аварии, вызванной столкновением.

Ключевые слова: плавучий энергоблок, безопасность, столкновение, метод конечных элементов, критическая скорость.

Введение

Устойчивое промышленное и социальное развитие труднодоступных регионов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока невозможно без решения проблемы энергообеспечения. Атомные станции малой мощности (АСММ) могут рассматриваться в качестве источника энергоснабжения удаленных населенных пунктов и промышленных производств, расположенных вне развитых энергосистем. Строительство АСММ в регионах с неразвитой транспортной и промышленной инфраструктурой трудно осуществить традиционными методами. Для прибрежных территорий конкурентоспособной альтернативой созданию наземных АСММ становится использование плавучих энергоблоков (ПЭБ), которые

строятся на специализированном предприятии и доставляются к месту эксплуатации в готовом виде, а при выводе из эксплуатации транспортируются на утилизацию и не оставляют на площадке радиоактивных отходов.

В 2019 г. в Певеке введен в эксплуатацию ПЭБ «Академик Ломоносов» с реакторными установками КЛТ-40С. В настоящее время реализуется программа создания четырех модернизированных плавучих энергоблоков (МПЭБ), размещаемых в районах мыса Наглейнган, Чаунской губы, Восточно-Сибирского моря для энергоснабжения Баимского горно-обогатительного комбината [1].

Основными отличительными особенностями МПЭБ (рис. 1) от ПЭБ «Академик Ломоносов» являются:

- применение реакторной установки типа РИТМ-200, серийное производство которой освоено для универсальных атомных ледоколов;



Рис. 1. МПЭБ в месте базирования. Источник: <https://seanews.ru/2022/04/22/ru-plavuchie-jenergobloki-zapitajut-baimskij-gok-na-chukotke/>

Fig. 1. Modernized Floating Power Unit at the basing site. Source: <https://seanews.ru/2022/04/22/ru-plavuchie-jenergobloki-zapitajut-baimskij-gok-na-chukotke/>

- отказ от комплекса обращения с отработавшим ядерным топливом, включающего хранилище облученных тепловыделяющих сборок;
- увеличение электрической мощности, выдаваемой береговым потребителям;
- отсутствие системы теплоснабжения береговых потребителей.

ПЭБ является стоечным судном, поэтому на него распространяются нормативные требования по ядерной и радиационной безопасности для судов с атомной энергетической установкой [2; 3]. В частности, при обосновании безопасности ПЭБ должны быть рассмотрены происшествия, связанные с внешними воздействиями, включая навигационные аварии [4].

В связи со спецификой жизненного цикла МПЭБ, заключающейся в том, что МПЭБ для перегрузки активных зон и ремонта раз в пять-шесть лет транспортируется с места базирования на специализированное предприятие, рассматривается таран МПЭБ при перегоне универсальным атомным ледоколом (УАЛ).

В месте базирования МПЭБ защищен гидротехническими сооружениями, что предотвращает несанкционированное приближение к нему арктических судов и ледоколов. Однако в случае неблагоприятных погодных условий возможен удар МПЭБ, закрепленного устройством жесткой швартовки, другим МПЭБ, устанавливаемым на место эксплуатации.

Методология анализа последствий навигационных аварий атомных судов включает: определение

первичных последствий (зоны разрушений корпусных конструкций и помещений судна, отказы оборудования и систем, находящихся в разрушенных или затопленных помещениях), на основе сценариев развития аварий определение радиационных последствий, оценку уровня безопасности судна с позиций ядерной и радиационной безопасности [6].

Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства [5] в районе реакторного отсека (РО) атомного судна должна быть предусмотрена конструктивная защита, которая предотвращает повреждение защитного ограждения, окружающего защитную оболочку (ЗО) реакторной установки, при столкновении с другим судном (рис. 2).

Радиационные последствия столкновения могут возникнуть в случае повреждения защитной оболочки и систем первого контура реакторной установки (РУ).

Для оценки энергопоглощения корпусных конструкций судна при столкновении, как правило, используются инженерные подходы [7—9], основанные на упрощенных расчетных моделях и полуэмпирических зависимостях, обоснованность которых подтверждена экспериментами на натуральных и полунатурных конструкциях. В ряде случаев применение инженерного подхода приводит к занижению энергоемкости разрушаемых конструкций, что удовлетворяет принципу консервативности при анализе безопасности атомных объектов. Однако

применение консервативного подхода при проектировании приводит к избыточному усилению конструктивной защиты, что увеличивает ее массу и соответственно водоизмещение судна.

В настоящее время для оценки энергоемкости корпусных конструкций судна в аварийных ситуациях также применяются программные комплексы (ANSYS, ЛОГОС), позволяющие рассчитывать деформирование конструкций (включая область больших пластических деформаций) методом конечных элементов (МКЭ) [10; 11]. Очевидное достоинство таких методов — возможность адекватного учета всех особенностей конструкции и высокая точность определения компонентов напряженно-деформированного состояния. При этом возможны дополнительный учет нелинейного поведения материалов, возникновения больших деформаций, особенностей контактного взаимодействия, нескольких видов трения, а также использование различных критериев разрушения. Однако достоверность результатов зависит от ряда факторов: размеров и типов конечных элементов, параметров расчетной модели и выбора критериев разрушения, что приводит к необходимости разработки индивидуальной расчетной схемы для конкретной задачи.

На основании зависимости энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций аварийного судна от глубины проникновения носа таранящего судна можно определить энергию удара и соответственно критическую скорость таранящего судна, а также оценить усилие взаимодействия и ускорение судна при столкновении.

Под критической скоростью понимается скорость таранящего судна, при которой происходит повреждение защитных барьеров, в качестве которых рассматриваются конструктивная защита, граница защитного ограждения, защитная оболочка.

Целью данной работы является анализ безопасности МПЭБ при столкновениях с использованием МКЭ.

Для достижения поставленной цели:

- разработана расчетная схема метода конечных элементов для моделирования разрушения корпусных конструкций МПЭБ;
- определена энергоемкость корпусных конструкций МПЭБ при таране;
- рассчитаны критические скорости таранящих судов;
- выполнен анализ последствий аварии.

Методы

В методиках расчета объемов повреждений корпусных конструкций судна при столкновении используется условие равенства энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций и энергии удара. Энергия удара при столкновении судов определяется как разность кинетической энергии движения судов до и после столкновения. Полученные разрушения будут зависеть от скорости, водоизмещения и вида носовой оконечности таранящего судна.

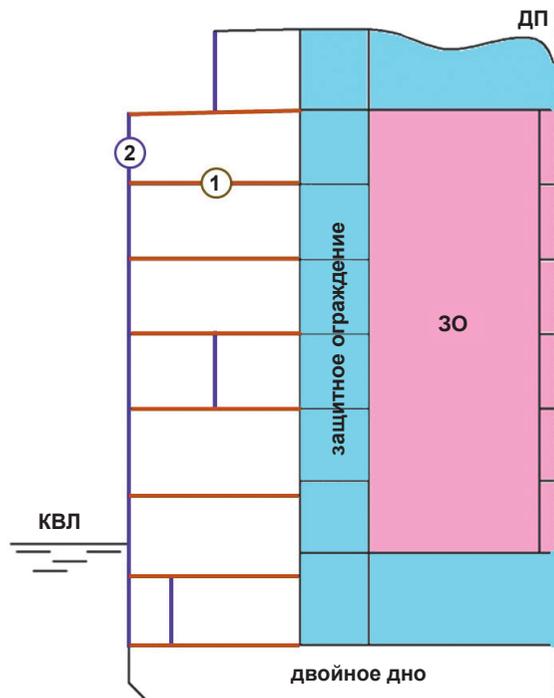


Рис. 2. Схема реакторного отсека МПЭБ. Цветами обозначены: защитная оболочка — розовым, защитное ограждение — голубым, конструктивная защита — коричневым (перекрытия палубного типа — 1) и фиолетовым (перекрытия бортового типа — 2); КВЛ — конструктивная ватерлиния, ДП — диаметральной плоскости. Иллюстрация авторов

Fig. 2. Scheme of the reactor compartment of the Modernized Floating Power Unit. The colors are indicated by: protective shell — pink, protective fencing — blue, structural protection — brown (deck-type overlaps — 1) and purple (side-type overlaps — 2); КВЛ — constructive waterline, ДП — diametral plane. Authors' illustration

Расчет критических скоростей таранящих судов включает следующие этапы:

- определение зависимости энергоемкости корпусных конструкций сталкивающихся судов от глубины внедрения носа таранящего судна с использованием метода конечных элементов;
- определение критических скоростей таранящего судна, при которых происходит разрушение защитных барьеров ядерной энергетической установки (конструктивной защиты, защитного ограждения, защитной оболочки).

Определение зависимости энергоемкости корпусных конструкций сталкивающихся судов от глубины внедрения носа таранящего судна.

В отечественной практике широко используется методика Крыловского государственного научного центра (методика КГНЦ) [7—9], разработанная на базе аналитических зависимостей строительной механики с учетом экспериментальных данных.

Схема разрушения палубного и бортового перекрытия, используемая в методике КГНЦ, представлена на рис. 3.

Основные допущения методики КГНЦ, определяющие ее консервативность:

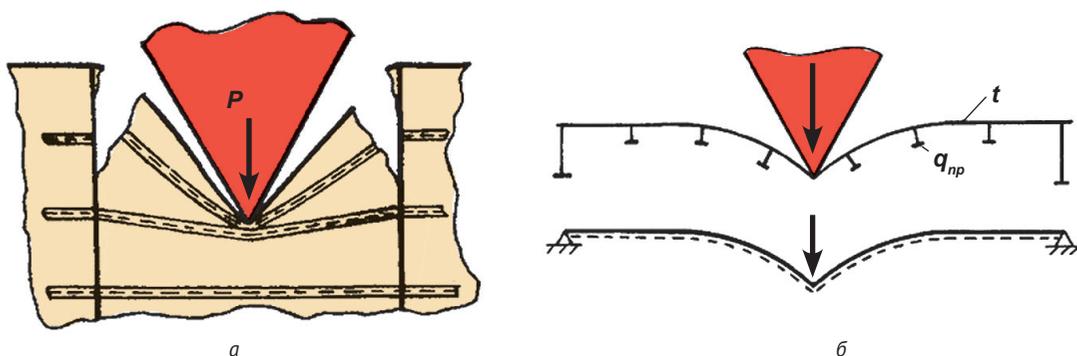


Рис. 3. Модели разрушения перекрытий инженерной методики: палубного (а), бортового (б) [7]
Fig. 3. Ship element destruction model used in engineering approaches: deck (a), side (б) [7]

- полная энергоемкость корпусных конструкций определяется как сумма энергоемкостей независимых разрушений ее составных элементов;
- не учитываются обводы (ширина) носовой оконечности таранящего судна, поэтому зона разрушения ограничивается одной рамной шпацией;
- для бортового перекрытия не учитывается прогрессирующее разрушение по мере внедрения форштевня таранящего судна, поэтому перекрытие исчерпывает сопротивление разрушению при достижении прогибом предельного значения в любой точке перекрытия.

Отказаться от допущений методики КГНЦ позволяют процедуры МКЭ, реализующие подробное пространственное описание процесса столкновения.

Выбор параметров численной модели для расчетов МКЭ осуществлен при расчете модельной задачи «Разрушение конструкции бортовой защиты

МПЭБ при бортовом таране судном с абсолютно жестким недеформируемым носом».

В расчетной модели МКЭ использовались оболочечные элементы с максимальным размером 100 мм. Процесс разрушения моделировался достижением в конечном элементе (КЭ) пластическими деформациями задаваемого предельного значения, приводящего к исключению этого КЭ из расчетной модели. Предельное значение пластических деформаций, равное 23,5%, принято по результатам предварительных численных исследований путем сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными [12] и рекомендациями [13; 14].

Расчеты МКЭ проводились для двух вариантов нагружения (см. рис. 4 и 5): локальное нагружение (разрушение форштевнем в пределах рамной шпации в соответствии с методикой КГНЦ) и разруше-

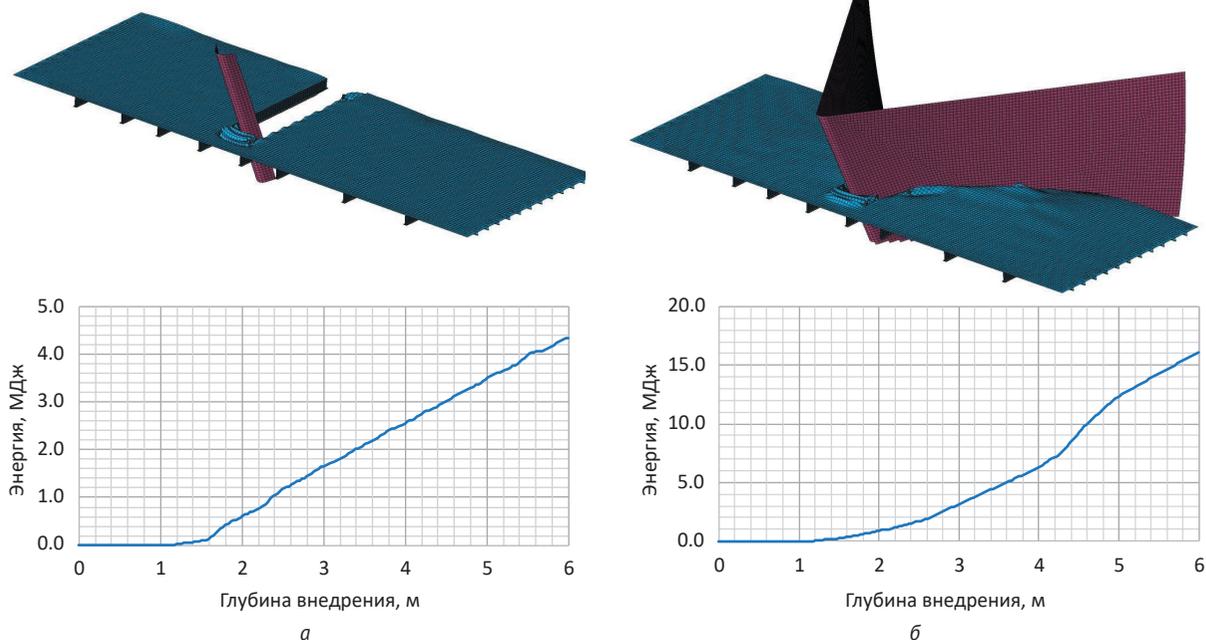


Рис. 4. Результаты расчета по МКЭ палубного перекрытия в виде формы разрушения и зависимости поглощаемой энергии от глубины внедрения: а – локальное нагружение, б – нагружение таранящим носом. Расчеты авторов
Fig. 4. The results of the FEM calculation of the deck overlap in the form of destruction and the dependence of the absorbed energy on the depth of penetration: а – local loading, б – loading with ramming bow. Authors' calculations

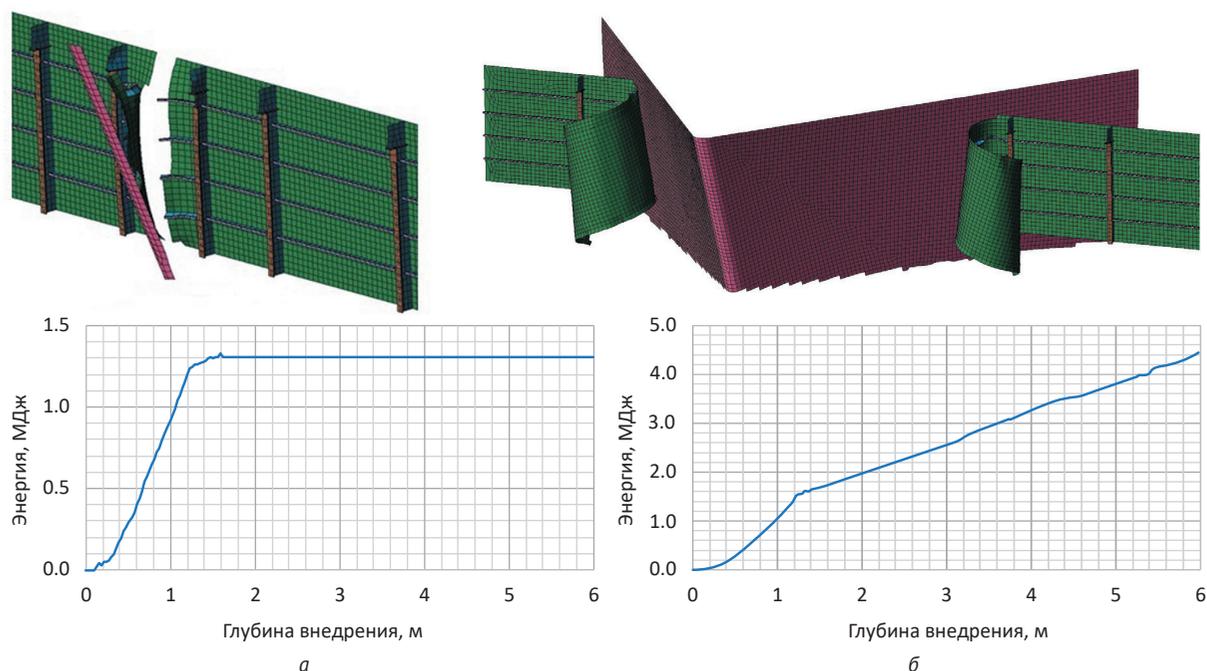


Рис. 5. Результаты расчета по МКЭ бортового перекрытия в виде формы разрушения и зависимости поглощаемой энергии от глубины внедрения: *а* – локальное нагружение, *б* – нагружение таранящим носом. Расчеты авторов
 Fig. 5. The results of the FEM calculation of the side overlap in the form of destruction and the dependence of the absorbed energy on the depth of penetration: *a* – local loading, *b* – loading with ramming bow. Authors' calculations

Таблица 1. Энергоемкость конструктивных элементов при разрушении, МДж

Конструктивный элемент (см. рис. 2)	Методика КГНЦ	МКЭ (локальное нагружение)	МКЭ (нагружение таранящим носом)
Элемент 1 (палубное перекрытие)	4,0	4,3	16,1
Элемент 2 (бортовое перекрытие)	0,44	1,31	4,4

ние жестким носом таранящего судна с заданными обводами.

Сравнение результатов расчетов энергоемкости конструктивных элементов МПЭБ, полученных по методикам КГНЦ и МКЭ, приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно хорошее согласование результатов (расхождение около 7,5%) для палубного перекрытия при локальном нагружении. Существенное расхождение наблюдается при нагружении таранящим носом (с учетом носовых обводов), что связано с увеличением объемов разрушения перекрытия по мере увеличения ширины внедряемой носовой оконечности (этот эффект не учитывается в методике КГНЦ). Для бортового перекрытия существенная разница результатов имеет место даже в случае локального нагружения. Полученные результаты подтверждают консервативность методики КГНЦ.

С использованием МКЭ выполнены расчеты для двух случаев тарана МПЭБ:

- универсальным атомным ледоколом;
- аналогичным МПЭБ.

Характеристики таранящих судов представлены в табл. 2.

Корпус таранимого МПЭБ (рис. 6) в расчетной модели разделен на деформируемый участок (РО и два смежных с ним отсека) и абсолютно жесткий участок (остальная часть корпуса). Деформируемый участок выполнен с высокой степенью детализации (см. рис. 5б), все конструктивные связи явным образом включены в модель. Максимальный размер конечного элемента в районе РО составляет 100 мм, в смежных отсеках — от 200 до 500 мм, для жесткого участка — 1000 мм. Для моделирования пластин обшивки, настилов, платформ, листовых деталей, стенок ребер жесткости, а также свободных поясков тавровых сварных профилей использовались оболочечные конечные элементы, свободные пояски полосообразных профилей моделировались балочными элементами. Для моделирования деформируемого участка применялась упругопластическая модель поведения материала с возможностью разрушения. Влияние скорости деформации на предел текучести материала не учитывалось, нагружение считалось квазистатическим. При моделировании контактного взаимодействия использовалась модель трения с динамическим коэффициентом 0,3.

Таблица 2. Характеристики таранящих судов для определения энергии удара и энергоемкости конструкций при ударе

Характеристика	УАЛ	МПЭБ
Водоизмещение, т	33 540	21 260
Длина по КВЛ, м	160	138,8
Ширина по КВЛ, м	33	30
Высота борта, м	15,2	10,2
Осадка, м	10,5	5,5
Угол наклона форштевня, град	15	16,45
Угол раствора носовой оконечности, град	70	120

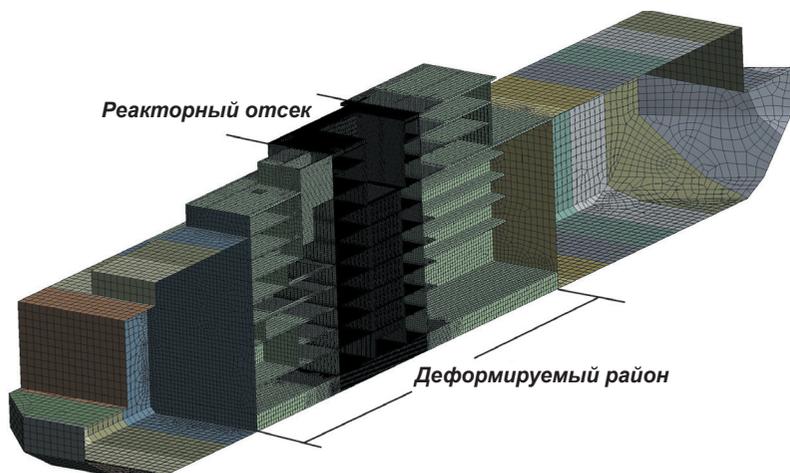


Fig. Finite element model of the Modernized Floating Power Unit. Authors' illustration

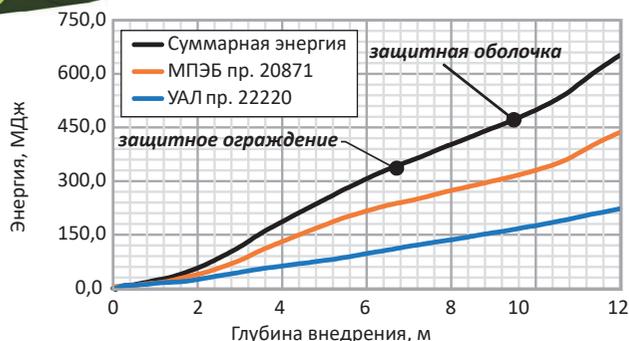
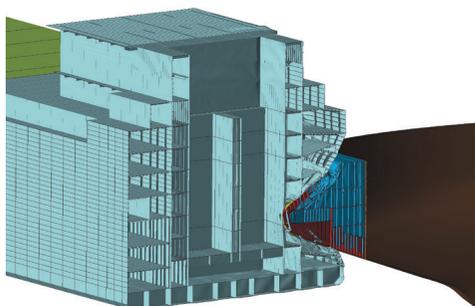
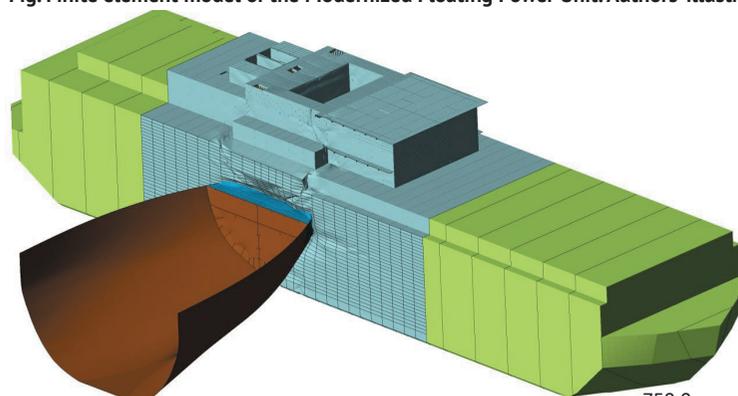


Рис. 7. Результаты расчетного исследования конструктивной защиты при таране деформируемым носом ледокола: а – общая картина деформирования, б – деформированное состояние в районе ЗО, в – кривая энергоемкости. Расчеты авторов

Fig. 7. The results of the FEM calculation for structural protection during ramming with a deformable bow of an icebreaker: а – general view of deformation, б – deformed state near protective shell, в – energy intensity curve. Authors' calculations

Моделировалось разрушение корпусных конструкций МПЭБ при таране другим судном под прямым углом в центральную часть РО.

При расчете тарана МПЭБ ледоколом использовались две модели носовой оконечности таранящего судна:

- модель деформируемой оконечности (рис. 7);
- модель абсолютно жесткой оконечности (рис. 8).

На рис. 7 представлена зависимость энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций МПЭБ и носовой оконечности таранящего судна (деформируемая модель носовой оконечности) от глубины внедрения носовой оконечности ледокола. Под глубиной внедрения понимается горизонтальное расстояние между передней точкой носовой оконечности и начальной точкой касания носовой оконечностью таранящего судна борта МПЭБ.

Результаты, полученные с использованием модели абсолютно жесткой оконечности, представлены на рис. 8.

При расчете тарана МПЭБ аналогичным МПЭБ использовалась модель абсолютно жесткого носа таранящего МПЭБ.

На рис. 9 приведены результаты расчетного анализа для случая столкновения с абсолютно жестким носом таранящего МПЭБ в виде формы деформирования конструкции и кривой энергоемкости.

Энергопоглощения корпусных конструкций при глубине внедрения таранящих судов до за-

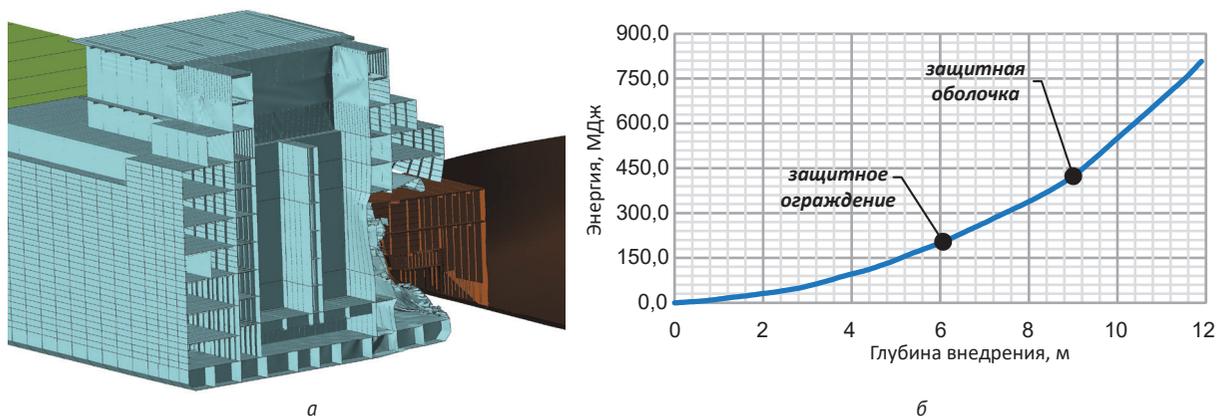


Рис. 8. Результаты расчетного исследования конструктивной защиты при таране жестким носом ледокола: *а* – деформированное состояние в районе ЗО, *б* – кривая энергоемкости. Расчеты авторов
 Fig. 8. The results of the FEM calculation for structural protection during ramming with a non-deformable (rigid) bow of an icebreaker: *a* – deformed state near protective shell, *б* – energy intensity curve. Authors' calculations

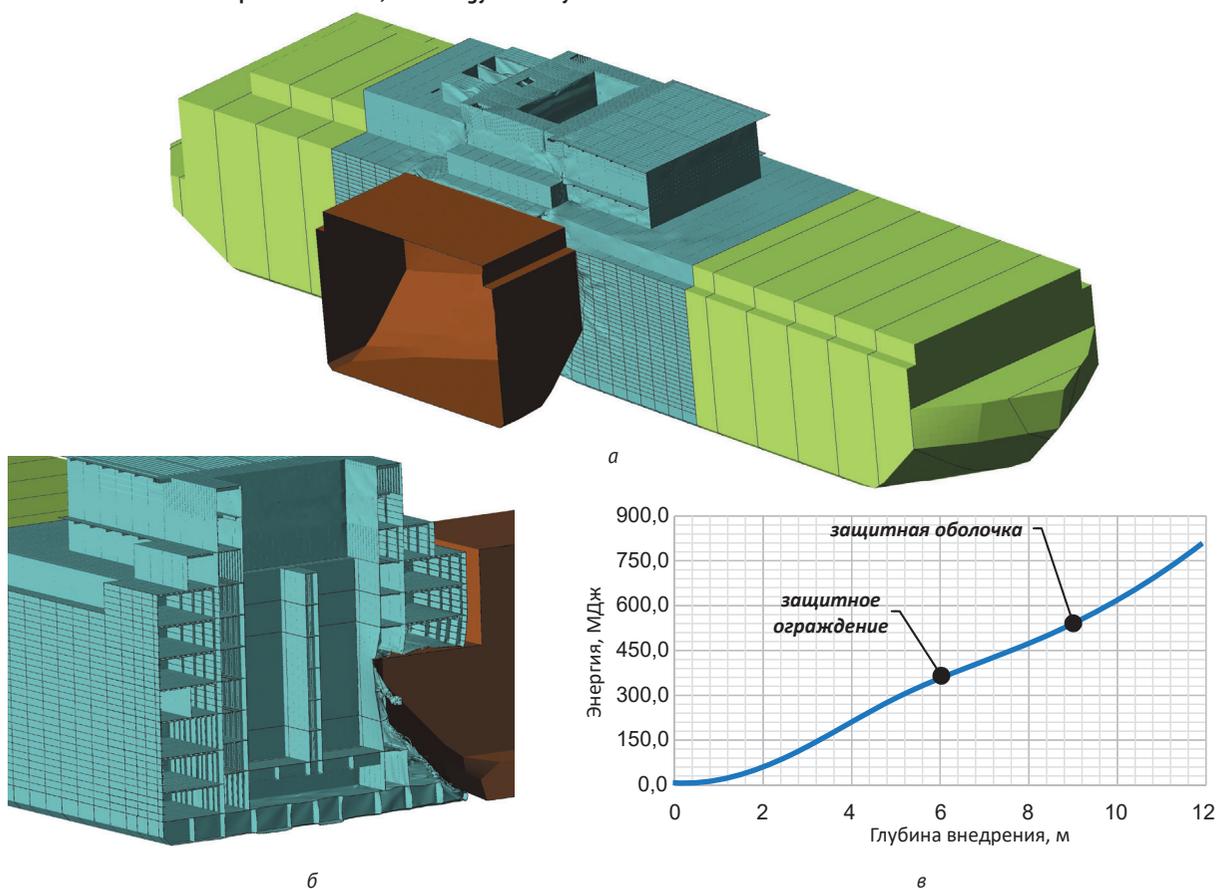


Рис. 9. Результаты расчетного исследования конструктивной защиты при таране абсолютно жестким носом МПЭБ: *а* – общая картина деформирования, *б* – деформированное состояние в районе ЗО, *в* – кривая энергоемкости. Расчеты авторов
 Fig. 9. The results of the FEM calculation for structural protection during ramming with an absolutely non-deformable MFPU bow: *a* – general view of deformation, *б* – deformed state near protective shell, *в* – energy intensity curve. Authors' calculations

щитного ограждения и защитной оболочки МПЭБ представлены в табл. 3. Энергоемкость ЗО при нарушении ее целостности незначительна — 5 МДж.

Определение критических скоростей. Критическая скорость определяется из условия равенства энергопоглощения корпусных конструкций и энергии удара:

$$E_{\text{полг.}} = E_{\text{удара}} \quad (1)$$

В случае столкновения на свободной воде (таран ледоколом) энергия удара определяется из решения задачи о неупругом ударе двух тел. Модели движения судов при столкновении и соответственно подходы к определению энергии удара предложены ря-

Таблица 3. Энергопоглощение при разрушении корпусных конструкций для различных случаев столкновений, МДж

Таранящее судно	Внедрение до защитного ограждения	Внедрение до защитной оболочки
УАЛ (деформируемая оконечность)	336	479
УАЛ (абсолютно жесткая оконечность)	354	665
МПЭБ (абсолютно жесткая оконечность)	200	424

дом авторов [12; 15; 16]. В данной работе для определения энергии, поглощаемой корпусными конструкциями МПЭБ при столкновении на открытой воде, используется подход, описанный в [12]. При расчете столкновения рассматриваются поступательное и вращательное движения (при нецентральной ударе) системы столкнувшихся судов с учетом присоединенных масс воды.

Схема столкновения судов представлена на рис. 10. Таранящее судно *a* со скоростью V_a сталкивается под углом α с таранимым судном *b*, имеющим скорость V_b . Система координат XU связана с морским дном, при этом ось X лежит в плоскости симметрии таранящего судна, а ось Y — в плоскости мидель-шпангоута. Столкновение происходит в точке с координатами (x_c, y_c) , которая является началом системы координат $\xi\eta$. Ось ξ направлена по нормали, ось η — по касательной к границе таранимого судна.

Полная энергия удара $E_{\text{удара}}$, которая должна быть поглощена при столкновении двух судов, определяется по формуле

$$E_{\text{удара}} = \frac{1}{2} \frac{\frac{M_a}{D_a}}{1 + \frac{M_a D_b}{D_a M_b}} \dot{\xi}(0)^2 + \frac{1}{2} \frac{\frac{M_a}{K_a}}{1 + \frac{M_a K_b}{K_a M_b}} \dot{\eta}(0)^2, \quad (2)$$

где

$$D_a = \frac{1}{1 + m_{ax}} (\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \sin \alpha + \left(\frac{1}{1 + m_{ay}} + \frac{4}{1 + j_a} \right) (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \cos \alpha;$$

$$D_b = \frac{1}{1 + m_{b2}} + \frac{16}{1 + j_b} \frac{d^2}{L_b^2} + \mu \frac{8}{1 + j_b} \frac{Bd}{L_b^2};$$

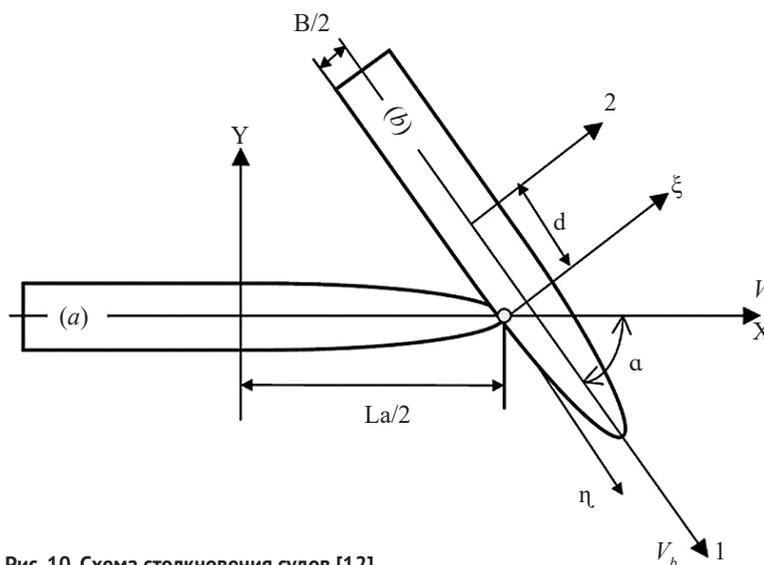


Рис. 10. Схема столкновения судов [12]
Fig. 10. Scheme of ship collision [12]

$$K_a = \frac{1}{1 + m_{ax}} \left(\cos \alpha + \frac{1}{\mu} \sin \alpha \right) \cos \alpha + \left(\frac{1}{1 + m_{ay}} + \frac{4}{1 + j_a} \right) \left(\sin \alpha - \frac{1}{\mu} \cos \alpha \right) \sin \alpha;$$

$$K_b = \frac{1}{1 + m_{b1}} + \frac{4}{1 + j_b} \frac{B^2}{L_b^2} + \frac{1}{\mu} \frac{8}{1 + j_b} \frac{Bd}{L_b^2};$$

m_{ax}, m_{b1} — коэффициенты присоединенных масс при продольной качке таранящего и таранимого судов соответственно ($m_{ax} = m_{b1} = 0,05$ [12]); m_{ay}, m_{b2} — коэффициенты присоединенных масс при поперечной качке таранящего и таранимого судов соответственно ($m_{ay} = m_{b2} = 0,4$ [17]); j_a, j_b — коэффициенты присоединенных масс для движения рысканьем таранящего и таранимого судов ($j_a = j_b = 0,21$ [12]); d — расстояние от центра таранимого судна до точки соударения (для МПЭБ $d = 9,2$ м); L_b — длина таранимого судна; B — ширина таранимого судна; μ — отношение ударных импульсов:

$$\mu = \frac{D_\xi \dot{\eta}(0) - K_\xi \dot{\xi}(0)(1+e)}{K_\eta \dot{\xi}(0)(1+e) - D_\eta \dot{\eta}(0)}.$$

Коэффициент $e \in [0,1]$ при полностью пластическом ударе, а при упругом ударе $e = 1$.

В момент удара относительные скорости таранящего и таранимого судов в точке удара x_c, y_c в направлениях ξ и η определяются через начальные скорости судна:

$$\dot{\xi}(0) = \dot{\xi}_a(0) - \dot{\xi}_b(0) = V_a \sin \alpha - V_b,$$

$$\dot{\eta}(0) = \dot{\eta}_a(0) - \dot{\eta}_b(0) = V_a \cos \alpha - V_b.$$

Координаты центров масс и точки удара связаны следующими соотношениями:

$$x_c - x_a = \frac{L_a}{2}, y_c = 0,$$

$$x_c - x_b = d \cos \alpha - \frac{B}{2} \sin \alpha,$$

$$y_c - y_b = -d \sin \alpha - \frac{B}{2} \cos \alpha.$$

Представленная методика расчета позволяет рассчитывать энергию удара в случае нецентрального столкновения. Для МПЭБ центр РО смещен относительно центра масс судна на 9,2 м в корму, при этом энергия удара максимальна при столкновении под углом 75°.

На рис. 11 показана зависимость энергии удара от угла столкновения (разности курсовых углов сталкивающихся судов) при таране МПЭБ ледоколом.

В месте базирования МПЭБ неподвижно закреплен, и соответственно вся кинетическая энергия таранящего судна (с учетом присоединенных масс воды) затрачивается на разрушение корпусных конструкций и может быть определена по формуле

$$E_{\text{удара}} = M_a (1 + m_{\text{ав}}) \frac{V_a^2}{2}.$$

Результаты расчета, позволяющие определить значения критических скоростей, представлены на рис. 12. При таране под прямым углом в центральную часть РО критические скорости УАЛ составляют $V_1 = 13,2$ уз (разрушение до защитного ограждения), $V_2 = 18$ уз (разрушение до защитной оболочки), критические скорости таранящего МПЭБ составляют $V_1 = 7,2$ уз и $V_2 = 10,4$ уз.

Анализ безопасности МПЭБ при столкновении.

При таране МПЭБ другим судном со скоростью ниже V_2 радиационные последствия исключены. Выход из строя оборудования и коммуникаций, расположенных в поврежденных помещениях, не

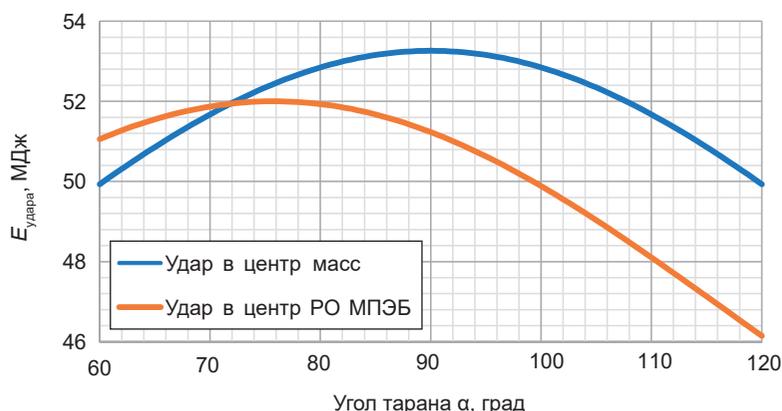


Рис. 11. Зависимость энергии удара от угла тарана. Расчеты авторов
Fig. 11. Dependence of the collision energy on the ramming angle. Authors' calculations

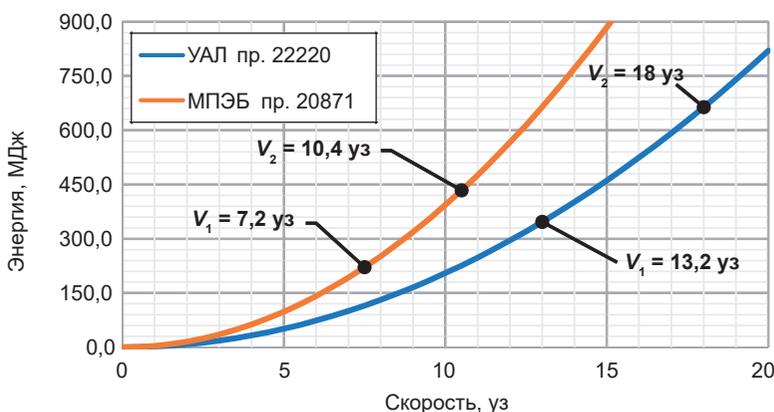


Рис. 12. Зависимость энергии прямого удара в центр РО МПЭБ от скорости столкновения. Расчеты авторов
Fig. 12. Dependence of the collision energy in the case of ramming in center of the MFPU reactor compartment on the collision velocity. Authors' calculations

приводит к потере функций систем безопасности вследствие реализации при проектировании принципа резервирования — оборудование, важное для безопасности, дублировано и размещено побортно.

В месте базирования под действием экстремальных природных воздействий и нарушений правил швартовки скорость таранящего МПЭБ не может превысить значение $V_2 = 10,4$ уз.

В случае тарана МПЭБ при перегоне ледоколом со скоростью до $V_2 = 13$ уз защитное ограждение не повреждается, и радиационная безопасность обеспечена, а при скорости, превышающей $V_2 = 18$ уз, возможно повреждение ЗО и нарушение герметичности первого контура, что приведет к радиационным последствиям вследствие утечки теплоносителя первого контура. Поскольку при перегоне МПЭБ реакторные установки выведены из действия и расхоложены, повреждения активных зон не происходит.

Скорость буксировки несамоходного МПЭБ не превышает 5 уз, поэтому необходимо принять орга-

низационные меры по ограничению скорости движения приближающихся судов величиной 8 уз.

Заключение

В статье показана возможность применения МКЭ для анализа безопасности МПЭБ при столкновениях.

По результатам расчетных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование МКЭ при анализе аварий атомных судов, вызванных столкновением, позволяет снять избыточную консервативность, характерную для инженерных методик, занижающих энергоемкость корпусных конструкций при разрушениях.

2. При определении объемов разрушений корпусных конструкций сталкивающихся судов и критических скоростей таранящих судов следует использовать модель деформируемой носовой оконечности таранящего судна.

3. Таран МПЭБ ледоколом (при перегоне МПЭБ) не приводит к радиационным последствиям при скоростях ледокола менее 18 уз. Таран раскрепленного МПЭБ аналогичным МПЭБ, вызванный экстремальными природными воздействиями, при его швартовке не приводит к радиационным последствиям, поскольку критическая скорость МПЭБ 10,4 уз не может быть достигнута. Таким образом, можно сделать общий вывод о высоком уровне безопасности МПЭБ относительно навигационных аварий, связанных со столкновениями.

4. При буксировке МПЭБ скорость приближающихся судов должна быть ограничена 8 уз.

Работа выполнена при частичном финансировании по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с п. 4 ст. 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2021-1206 от 30 сентября 2021 г.

Литература

1. 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. — С. 56—60.
2. Общие положения обеспечения безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами (НП-022-17). — М.: Ростехнадзор, 2017.
3. Правила ядерной безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами (НП-029-17). — М.: Ростехнадзор, 2017.

4. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. — СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2018.

5. Требования к отчету по обоснованию безопасности судов и других плавсредств с ядерными реакторами (НП-023-20). — М.: Ростехнадзор, 2020.

6. Кудинович И. В. Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях // Тр. Крыл. гос. науч. центра. — 2019. — № 1 (387). — С. 131—142.

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. — СПб., 2013. — 43 с.

8. Нестеров А. Б. Исследование эффективности конструктивной бортовой защиты при аварийном столкновении судов // Вопр. судостроения. Сер. Проектирование судов. — 1984. — Вып. 40. — С. 46—52.

9. Лепп Ю. Ф. Оценка защищенности грузовых помещений от повреждений при столкновениях // Судостроение. — 1980. — № 5. — С. 10—13.

10. Родионов А. А., Го Цзюнь. Исследование проблем предельной прочности корпусных конструкций при повреждениях от столкновения судов // Мор. интеллект. технологии. — 2010. — № 1 (7). — С. 13—25.

11. Родионов А. А., Аунг Куи Мьинт. Численное моделирование аварийного разрушения днищевого перекрытия при контакте с подводным камнем // Тр. Крыл. гос. науч. центра. — 2014. — Вып. 82 (366). — С. 31—36.

12. Zhang S. The mechanics of ship collision. — Denmark, 1999. — 284 p.

13. Kitamura O., Endo H. Collision simulations of an exclusive ship of spent nuclear fuels // Proceedings of international workshop on utilization of nuclear power in oceans. — 2000. — P. 104—112.

14. Родионов А. А., Васильев Р. В. Оценка критериев разрушения судовых конструкций при численном моделировании столкновения судов // Мор. интеллект. технологии. — 2011. — № 4 (14). — С. 7—15.

15. Волков Н. Н., Кодацкий С. Б. Конструктивные особенности атомных судов. — Л.: Судостроение, 1971. — 248 с.

16. Petersen M. J. Dynamics of ship collisions // Ocean engineering. — 1982. — Vol. 9 (4). — P. 295—329.

17. Minorsky V. U. An analysis of ship collision to protection of nuclear powered plant // J. of ship research. — 1959. — Vol. 3 (1). — P. 1—4.

Информация об авторах

Коршунов Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

Кудинович Игорь Владиславович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела — заместитель начальника отделения, Крыловский государственный научный центр (196142, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44), e-mail: i_kudinovich@ksrc.ru.

Родионов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

Сутеева Аделина Жанатовна, ведущий инженер, Крыловский государственный научный центр (196142, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44), e-mail: A_Suteeva@ksrc.ru.

Шувалов Глеб Михайлович, кандидат физико-математических наук, инженер 1-й категории, Крыловский государственный научный центр (196142, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44), e-mail: shuvalov.gleb@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Коршунов В. А., Кудинович И. В., Родионов А. А. и др. Анализ безопасности модернизированного плавучего энергоблока при столкновениях // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 211—222. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-211-222.

SAFETY ANALYSIS OF THE FLOATING POWER UNIT UNDER COLLISION

Korshunov, V. A.

Saint Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Kudinovich, I. V.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Rodionov, A. A.

Saint Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Suteeva, A. Zh.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Shuvalov, G. M.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on October 20, 2022

Abstract

The article considers a possible navigational accident associated with the ramming of a modernized floating power unit (MFPU) by another ship. The authors suggest an approach to determine the consequences of a collision using the finite element method. The finite element model has been developed for modeling the destruction of ship hull structures, to determine the energy intensity of ship hull structures during ramming, and to calculate the critical velocity of ramming ships.

The study results provide the following conclusions: 1) the use of the finite element method in the analysis of collisions of nuclear ships helps removing excessive conservatism characteristic of engineering approaches that underestimate the energy intensity of structural elements during destruction. 2) when determining the volume of destruction of the hull structures of colliding ships and the critical velocity of ramming ships, it is necessary to use the model of the deformable bow of a ramming ship. 3) ramming the floating power unit by an icebreaker does not lead to radiation consequences at icebreaker velocity of less than 18 knots. The ramming of an unfastened floating power unit with a similar one caused by extreme natural impacts during its mooring does not lead to radiation consequences, since the critical velocity of the floating power unit of 10.4 knots cannot be achieved.

Thus, it is shown that the modernized floating power unit has a high level of safety in case of navigation accidents associated with collisions.

Keywords: (modernized) floating power unit, safety, collision, finite element method, critical velocity.

The work was partially funded under an agreement on the provision of grants from the federal budget in the form of subsidies in accordance with paragraph 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation No. 075-15-2021-1206 of September 30, 2021.

References

1. Vladimirov A. A., Makeev G. A. Experience and prospects for the creation of floating power units for the development and development of the territories of the Russian North and the Far East. *Sudostroenie*, 2021, no. 4, pp. 56—60. (In Russian).
2. General provisions for ensuring the safety of ships and other floating craft with nuclear reactors (NP-022-17). Moscow, Rostekhnadzor, 2017. (In Russian).
3. Nuclear Safety Rules for Ships and Other Vessels with Nuclear Reactors (NP-029-17). Moscow, Rostekhnadzor, 2017. (In Russian).
4. Rules for the classification and construction of nuclear ships and floating structures. Saint Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudohodstva, 2018. (In Russian).
5. Requirements for the Safety Analysis Report for Ships and Other Vessels with Nuclear Reactors (NP-023-20). Moscow, Rostekhnadzor, 2020. (In Russian).
6. Kudinov I. V. Substantiation of nuclear and radiation safety of a nuclear vessel under external influences. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, no. 1 (387), pp. 131—142. (In Russian).
7. Nesterov A. B. Solving the problems of emergency strength and environmental safety of ships for the sea transportation of toxic cargo by improving ship hull structures. Abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Saint Petersburg, 2013, 43 p. (In Russian).
8. Nesterov A. B. Investigation of the effectiveness of constructive onboard protection in case of an emergency collision of ships. *Voprosy sudostroeniya. Ser. Proektirovanie sudov*, 1984, vol. 40, pp. 46—52. (In Russian).
9. Lepp Yu. F. Assessing the protection of cargo spaces from damage during collisions. *Sudostroenie*, 1980, no. 5, pp. 10—13. (In Russian).
10. Rodionov A. A., Go Jun. Investigation of problems of ultimate strength of hull structures in case of ship collision damage. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2010, no. 1 (7), pp. 13—25. (In Russian).
11. Rodionov A. A., Aung Kui M'int. Numerical modeling of emergency destruction of the bottom floor in contact with underwater rock. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2014, vol. 82 (366), pp. 31—36. (In Russian).
12. Zhang S. The mechanics of ship collision. Denmark, 1999, 284 p.
13. Kitamura O., Endo H. Collision simulations of an exclusive ship of spent nuclear fuels. Proceedings of international workshop on utilization of nuclear power in oceans, 2000, pp. 104—112.
14. Rodionov A. A., Vasil'ev R. V. Estimation of criteria for the destruction of ship structures in numerical simulation of ship collision. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2011, no. 4 (14), pp. 7—15. (In Russian).
15. Volkov N. N., Kodackii S. B. Design features of nuclear ships. *Sudostroenie*, 1971, 248 p. (In Russian).
16. Petersen M. J. Dynamics of ship collisions. *Ocean engineering*, 1982, vol. 9 (4), pp. 295—329.
17. Minorsky V. U. An analysis of ship collision to protection of nuclear powered plant. *J. of ship research*, 1959, vol. 3 (1), pp. 1—4.

Information about the authors

Korshunov, Vladimir Aleksandrovich, PhD of Engineering, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

Kudinovich, Igor Vladislavovich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of Department — Deputy Head of Department, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196142), e-mail: i_kudinovich@ksrc.ru.

Rodionov, Alexander Alexandrovich, Doctor of Engineering, Professor, Head, Department of Structural Mechanics of the Ship, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

Suteeva, Adelina Zhanatovna, Leading Engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196142), e-mail: A_Suteeva@ksrc.ru.

Shuvalov, Gleb Mikhailovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Engineer of the 1st category, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196142), e-mail: shuvalov.gleb@gmail.com.

Bibliographic description of the article

Korshunov, V. A., Kudinov, I. V., Rodionov, A. A., Suteeva, A. Zh., Shuvalov, G. M. Safety analysis of the floating power unit under collision. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 211—222. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-211-222. (In Russian).