

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-131-142

УДК 621.039.58:629.5

И.В. Кудинович

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

ОБОСНОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОГО СУДНА ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Объект и цель научной работы. Объектом работы являются атомные суда, целью – обоснование ядерной и радиационной безопасности атомных судов при внешних воздействиях и пожарах на борту.

Материалы и методы. В работе использован метод системного анализа.

Основные результаты. Предложена методология анализа аварий атомного судна, вызванных внешними воздействиями и пожарами на борту. На основе разработанной методологии в соответствии с требованиями действующей нормативной базы обоснована ядерная и радиационная безопасность УАЛ проекта 22220 и ПЭБ проекта 20870.

Заключение. В ходе анализа установлено, что безопасность судна обеспечена в случае всех проектных аварий, вызванных внешними воздействиями. Наиболее тяжелыми по радиационным последствиям являются запроектные аварии с разрушением защитных барьеров реакторной установки в результате тарана в район реакторного отсека другим судном, скорость которого существенно больше критической (5-6 уз), или при длительной посадке УАЛ (ПЭБ) на скалистую отмель в штормовых условиях. В этих случаях недопустимое радиационное воздействие в результате выброса радиоактивных веществ в атмосферу или морскую среду может проявляться на расстояниях 20–30 километров.

Ключевые слова: авария, атомное судно, внешние воздействия, ядерная и радиационная безопасность, ядерная энергетическая установка.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-131-142

UDC 621.039.58:629.5

I. Kudinovich

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

NUCLEAR AND RADIATION SAFETY JUSTIFICATION FOR A NUCLEAR SHIP UNDER EXTERNAL EFFECTS

Object and purpose of research. This paper justifies nuclear and radiation safety of nuclear ships in the conditions of external effects and onboard fires.

Materials and methods. This paper follows the method of system analysis.

Main results. This paper suggests analysis methodology for emergencies aboard nuclear ships due to external effects and onboard fires. Based on this methodology and in compliance with applicable regulations, this paper justifies nuclear and radiation safety of Project 22220 multi-purpose icebreaker and Project 20870 floating NPP.

Conclusion. The analysis has shown that ship safety is ensured for all scenarios of non-design emergencies due to external effects. In terms of radiation-related outcomes, worst-case scenarios are non-design emergencies with protective nuclear reactor barriers failing due to ramming by other ship going well above critical speed (5-6 knots), or due to long stranding of icebreaker (floating NPP) on a rocky bank in stormy conditions. In these conditions, unacceptable radiation impact due to release of radioactive substances into the atmosphere or into water may spread by as far as 20–30 km.

Keywords: emergency, nuclear ship, external effects, nuclear and radiation safety, nuclear reactor.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Кудинович И.В. Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 131–142.

For citations: Kudinovich I. Nuclear and radiation safety justification for a nuclear ship under external effects. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 131–142 (in Russian).

Введение

Introduction

Россия является единственной страной, обладающей гражданским атомным флотом, что объясняется наличием стратегических интересов в Арктике. В Морской доктрине Российской Федерации [1] в числе долгосрочных задач указано «строительство атомного ледокольного флота и повышение безопасности его эксплуатации».

Гражданские атомные суда относятся к объектам использования атомной энергии (ОИАЭ), что указано в «Законе об использовании атомной энергии» [2]: «ядерные установки (объекты использования атомной энергии) – сооружения и комплексы с ядерными реакторами, в том числе атомные станции, суда и другие плавсредства...». Следует отметить, что в соответствии с этим законом понятие «ядерная установка» применительно к морским объектам не ограничено только ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), а включает все атомное судно.

Одним из основных требований к ядерной установке является обеспечение ядерной и радиа-

ционной безопасности. Под ядерной безопасностью понимается предотвращение недопустимых повреждений активной зоны реактора, а под радиационной безопасностью – предотвращение сверхнормативного загрязнения окружающей среды и связанного с ним радиационного воздействия на человека.

Особую актуальность проблема обоснования ядерной и радиационной безопасности объектов использования атомной энергии приобрела в связи с ужесточением международных и отечественных требований безопасности в области ядерной энергетики, обусловленных рядом тяжелых аварий, наиболее известными из которых являются авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США, Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» в Японии. «Конвенция о ядерной безопасности», вступившая в силу для Российской Федерации в 1996 г., предусматривает введение соответствующих национальных требований и регулирующих положений в области безопасности, а также систему лицензирования в отношении ядерных установок и запрещение эксплуатации ядерной установки без лицензии. На рис. 1 показана хронология введения отечествен-

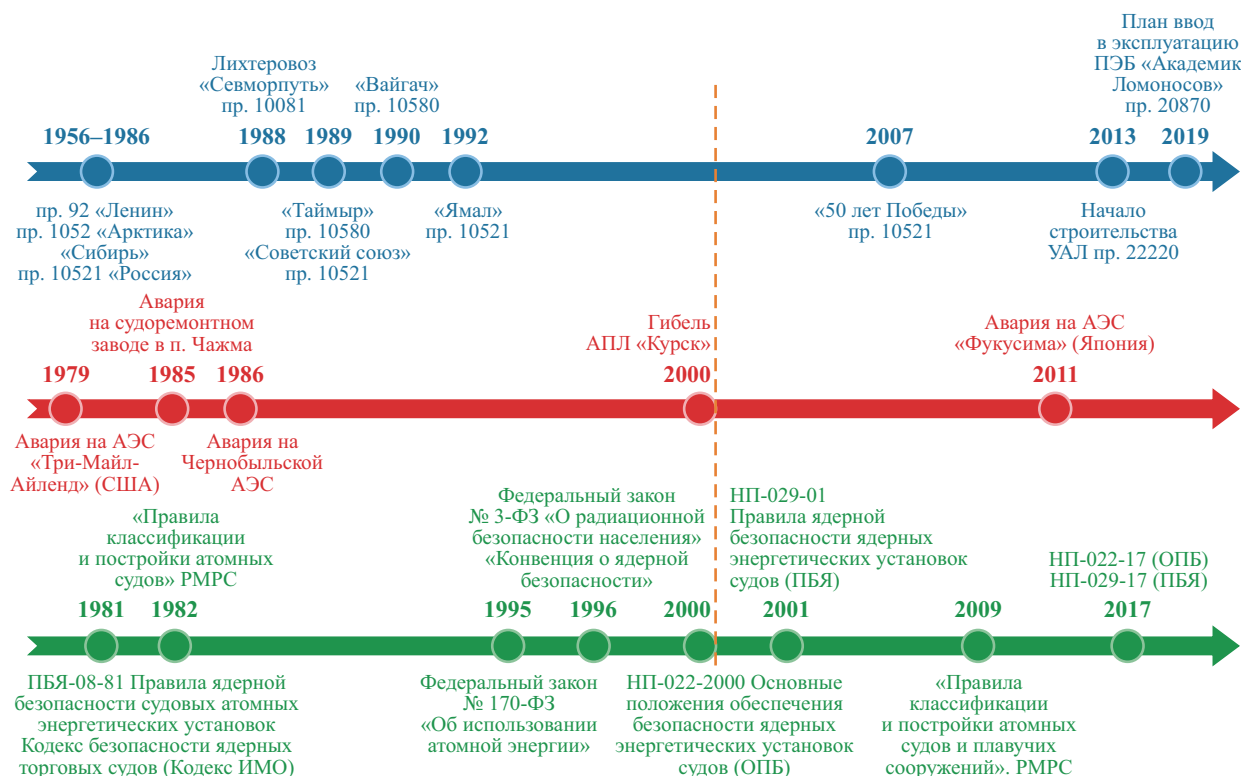


Рис. 1. Хронология развития атомного флота и требований по ядерной и радиационной безопасности

Fig. 1. Evolution of nuclear fleet and nuclear & radiation safety requirements

ных нормативных документов в области ядерной и радиационной безопасности гражданских атомных судов.

Проектирование судов и иных плавсредств с ЯЭУ осуществляется с соблюдением норм и правил в области использования атомной энергии [3, 4], Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) [5]. Соответствие проекта атомного судна требованиям безопасности подтверждается в следующих документах: Отчет по обоснованию безопасности ЯЭУ судна (ООБ) [6], который представляется в Ростехнадзор для получения лицензии на строительство и эксплуатацию ОИАЭ, и Информация по безопасности судна, представляемая на одобрение в РМРС в составе технического проекта [5].

В соответствии с нормативным документом [6] при анализе аварий исходные события разделяются на внутренние и внешние по отношению к реакторной установке. К внутренним событиям относятся увеличение или уменьшение теплоотвода от первого контура, несанкционированное изменение реактивности, разгерметизация первого контура, аварии с ядерным топливом при перегрузках, нарушения в обеспечении электроэнергии. Внешние события – это навигационные аварии, пожары и взрывы на судне, падение летательного аппарата. В наибольшей степени специфика атомного судна по сравнению с другими видами ОИАЭ проявляется при анализе аварий, вызванных внешними воздействиями, что требует разработки специального методического подхода.

В 90-х гг. в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (Л.П. Седаков, А.А. Крайнов, А.В. Воронцов) разработана методология анализа аварий и обоснования уровня безопасности системы «АЭУ – корабль – окружающая среда» [7–9]. Следует отметить, что основное направление работ было связано с созданием методологии технического обоснования безопасности ЯЭУ кораблей ВМФ, которые существенно отличаются от гражданских атомных судов по конструктивному исполнению, районам и условиям эксплуатации; кроме того, на них распространяется другая нормативная база.

При проектировании новых атомных судов – универсального атомного ледокола (УАЛ) проекта 22220 и плавучего энергоблока (ПЭБ) проекта 20870 – возникла необходимость разработки методического подхода, позволяющего выполнить обоснование их безопасности в соответствии с требованиями действующих нормативных документов по ядерной и радиационной безопасности.

Методология анализа ядерной и радиационной безопасности атомных судов при внешних воздействиях

Analysis methodology for nuclear and radiation safety of nuclear ships under external effects

Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях включает три этапа:

- формирование перечня исходных событий, вызванных внешними воздействиями на ядерную установку, определение их характеристик и классификация (рис. 2а);
- анализ развития аварий и определение конечных состояний ядерной установки (рис. 2б);
- обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна (рис. 2в).

В нормативных требованиях по обоснованию безопасности ЯЭУ гражданских судов [4, 6] предусматривается разделение аварийных ситуаций, вызванных внутренними и внешними воздействиями, на проектные и запроектные. При этом к проектным относят аварии, для которых проектом предусмотрены системы безопасности, с учетом единичного отказа ограничивающие ее последствия, а к запроектным – аварии, для предотвращения опасного развития которых не предусмотрено соответствующих средств безопасности, их радиационные последствия могут превышать допустимые проектные пределы.

Аварийные ситуации, связанные с внешними воздействиями, могут вызвать большие разрушения корпусных конструкций судна и привести, так же как и пожары, к множественным отказам оборудования ЯЭУ по так называемой общей причине. Поэтому при анализе таких аварийных ситуаций затруднительно использовать принцип единичного отказа.

В качестве критерия классификации аварий при внешних воздействиях на проектные и запроектные целесообразно использовать вероятность их возникновения. При проектировании ядерно и радиационно-опасных объектов допускается не учитывать факторы техногенного происхождения, вероятность реализации которых меньше 10^{-6} событий в год [10]. Таким образом, вероятность исходных событий запроектных аварий по внешним причинам должна быть менее 10^{-6} событий в год, при большей вероятности авария по внешним причинам относится к проектным.

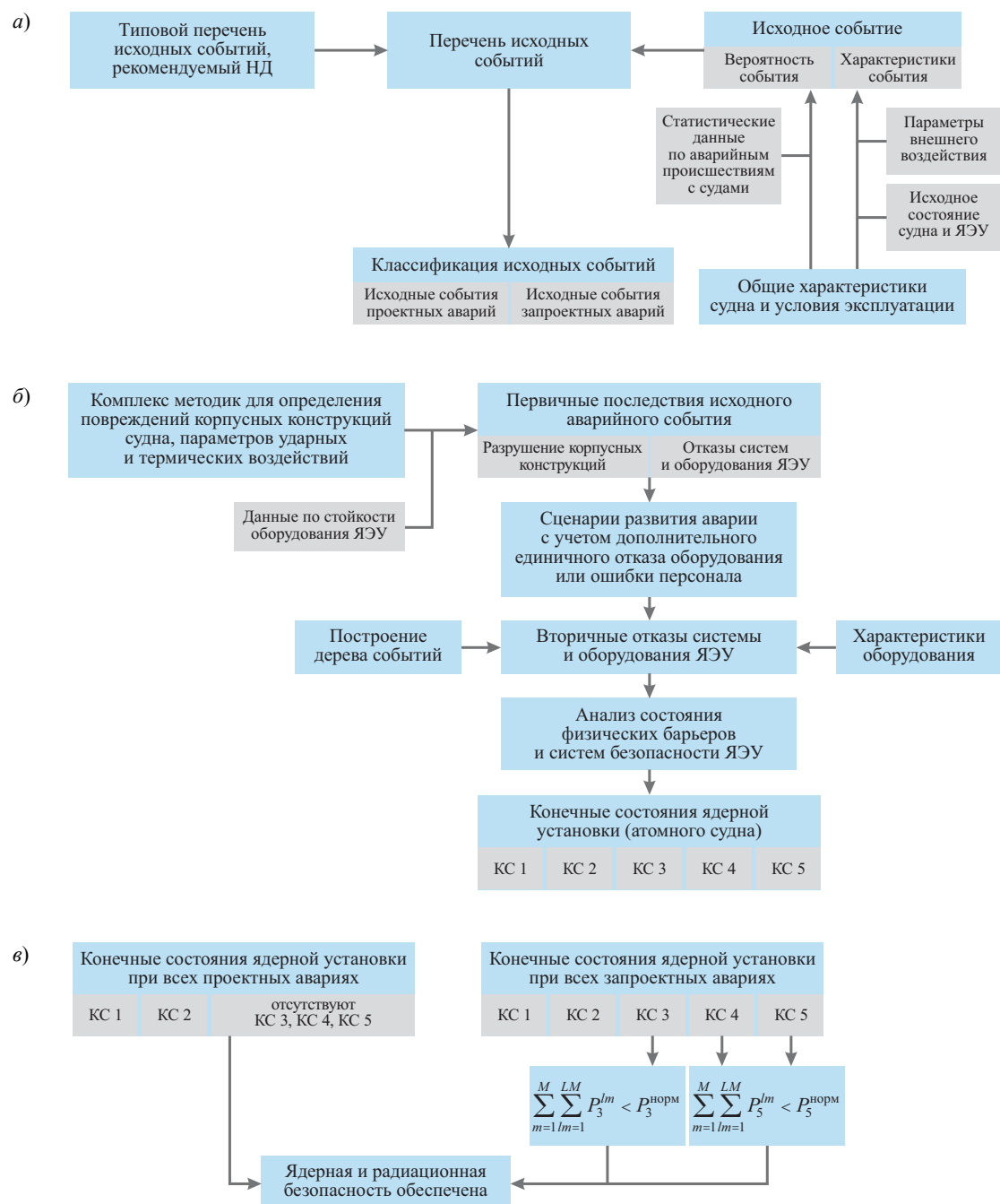


Рис. 2. Блок-схемы методологии анализа ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях: а) формирование перечня исходных событий проектных и запроектных аварий с определением их характеристик; б) анализ развития аварий и определение конечных состояний ядерной установки при внешнем воздействии; в) обоснование безопасности атомного судна при внешних воздействиях

Fig. 2. Flow charts for methodology analysis of nuclear and radiation safety of nuclear ship under external effects: а) generation of list of initial events for design and non-design emergencies, with determination of their characteristics; б) development analysis and determination of terminal states for a nuclear power plant under external effect; в) safety justification for a nuclear ship under external effects

В табл. 1 представлены вероятности исходных событий, связанных с внешними воздействиями на атомное судно и пожарами на его борту, в табл. 2 – перечень исходных событий проектных и запроектных аварий для УАЛ и ПЭБ.

Важной задачей при анализе аварий является определение параметров внешних воздействий, при которых обеспечивается ядерная и радиационная безопасность атомного судна. Например, причиной аварии на АЭС «Фукусима» стал неправильный выбор параметров внешних воздействий (заниженная высота волны цунами), которые были приняты в проекте АЭС, в результате чего технические мероприятия по защите станции от цунами оказались неэффективными и привели к аварии с радиационными последствиями. Альтернативным примером является катастрофа атомного подводного крейсера «Курск», когда благодаря высокой ударостойкости оборудования ЯЭУ, ядерная и радиационная безопасность была обеспечена несмотря на сильные разрушения корпусных конструкций корабля, вызванных внутренним взрывом торпедного боезапаса.

Таблица 1. Вероятности внешних воздействий на атомное судно

Table 1. Probabilities of external effects upon nuclear ship

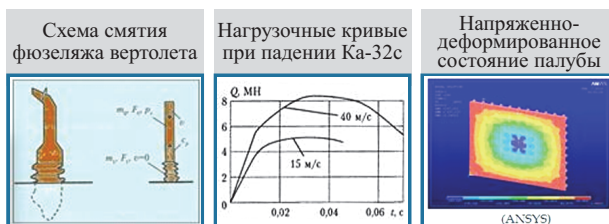
Наименование исходного события	Вероятность, 1/год
Столкновение с другим судном	$5 \cdot 10^{-5}$
Таран в район реакторного отсека	$1 \cdot 10^{-7}$
Затопление при столкновении	$5 \cdot 10^{-7}$
Посадка на мель	$3 \cdot 10^{-4}$
Падение вертолета	$1 \cdot 10^{-4}$
Пожар в помещении ЯЭУ	$1 \cdot 10^{-3}$

Факторы прямого воздействия исходных событий на атомное судно приводят к первичным последствиям. В случае внешних воздействий к первичным последствиям относятся разрушение корпусных конструкций и помещений судна, выход из строя оборудования, находящегося в разрушенных или затопленных помещениях, отказы оборудования и систем в результате динамических воздействий при удар-

Навигационные аварии

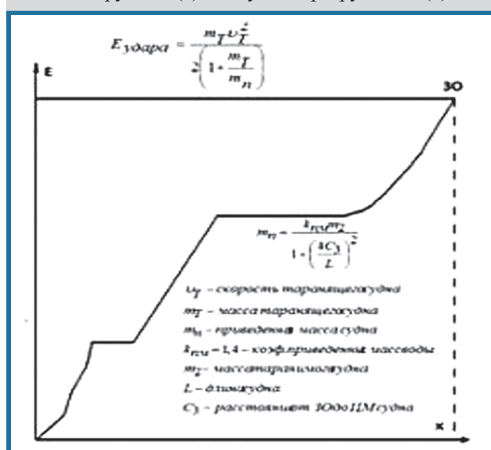
Критическая скорость столкновения (защитная оболочка повреждена)		
Тип судна	D, тыс. т	V _{кр} , уз
Суда малого водоизмещения	5 7	6,8 5,9
а/л «Арктика»	21	7,9
«Севморпуть»	60	6,4

Падение летательного аппарата



Масса вертолета – 10 т. высота падения – 50 м

Зависимость энергии разрушения корпусных конструкций (ε) от глубины разрушения (x)



Пожары



Рис. 3. Методики анализа аварий

Fig. 3. Emergency analysis guidelines

ных нагрузках и взрывах, а также в результате термических воздействий при пожарах.

Для определения характера и масштаба разрушений или повреждений корпусных и защитных конструкций судна, параметров ударных и терми-

ческих воздействий, установления первичных отказов и разрушений в составе оборудования и системах безопасности ЯЭУ использован комплекс методик, разработанный ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (рис. 3),

Таблица 2. Перечень исходных событий проектных и запроектных аварий, вызванных внешними воздействиями на ЯЭУ УАЛ и ПЭБ

Table 2. List of initial events for design and non-design emergencies due to external effects upon reactors of multi-purpose nuclear icebreaker and floating NPP

№ п/п	Исходное событие		Классификация аварийной ситуации	Требования Правил РМРС [5]	Рекомендации Ростехнадзора (НП-023-2000 [6])
	УАЛ	ПЭБ			
1	Таран со скоростью меньше 5 уз		Проектная	Столкновение Потеря маневренности	Ударные воздействия столкновения Столкновение с судном (пирсом) с поступлением воды в энергетические и вспомогательные отсеки
	Таран со скоростью больше 5 уз		Запроектная		
2	Посадка на мель (мягкий грунт) Удар о подводный камень Посадка на мель (скалистая отмель)		Проектная Проектная Запроектная	Посадка на мель	Посадка на мель Ударные воздействия посадки на мель
3	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде		Запроектная Запроектная	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде	Затопление на мелкой воде Затопление на глубокой воде
4	Падение вертолета	—	Проектная	Падение вертолета	Падение вертолета массой 10 т с высоты 50 м на помещения ЯЭУ, на корпусные конструкции судна, содержащие потенциально опасное обо- рудование
	—	Падение вертолета	Запроектная		
5	Пожары в помещениях энергетической установки		Проектная	Пожар в защит- ном ограждении, в любом другом месте на судне	Пожар на центральном посту управления и энергетическом отсеке, в том числе в машинном отделении, электротехниче- ском отсеке, помещениях аппаратуры корабельной системы управления техническими средствами
6	Взрыв авиационного топлива	—	Проектная	Взрыв в любом месте на судне	Ударные волны, вызванные взрывами на борту судна
	Взрывы баллонов высокого давления		Запроектная		
7	—	Внешние взрывы	Проектная	—	Ударные волны, вызванные деятельностью человека при нахождении судна в порту
8	—	Сейсмическое воздействие	Проектная	—	—

включающий методики определения характера и объема разрушений корпусных конструкций судна в результате навигационных аварий (А.Б. Нестеров), характера разрушений и параметров сотрясений корпусных конструкций судна при воздействии взрывов и падении летательных аппаратов (А.И. Дульнев), моделирование пожаров в помещениях судна (С.В. Шедько). Достоверность методик подтверждена расчетными и экспериментальными исследованиями на стендовых установках [11].

В методиках определения объема повреждений судна при столкновениях и ударах [12] 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 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 конструкций выполняется по инженерной методике, разработанной с использованием экспериментальных данных по разрушению полунатурных конструкций. На основании зависимости энергопоглощения при разрушении корпусных конструкций аварийного судна от глубины проникновения носа таранящего судна можно определить критическую скорость таранящего судна, при которой будет повреждена защитная оболочка реакторной установки, а также оценить усилие взаимодействия и ускорение судна при столкновении.

При анализе аварийной ситуации, связанной с падением вертолета на атомное судно, принимается падение летательного аппарата под прямым углом на жесткую преграду, что определяет консервативную (максимальную) оценку силового нагружения [13]. Фюзеляж вертолета рассматривается как пластически деформированная при смятии оболочка с распределенной по длине массой. В качестве основного параметра, характеризующего силовое нагружение конструкций при ударе, принимается «нагрузочная кривая» – зависимость нагрузки от времени при падении вертолета на жесткую преграду. Расчет напряженно-деформированного состояния корпусных конструкций судна проводится с использованием программы ANSYS. Предполагается, что разрушение хотя бы

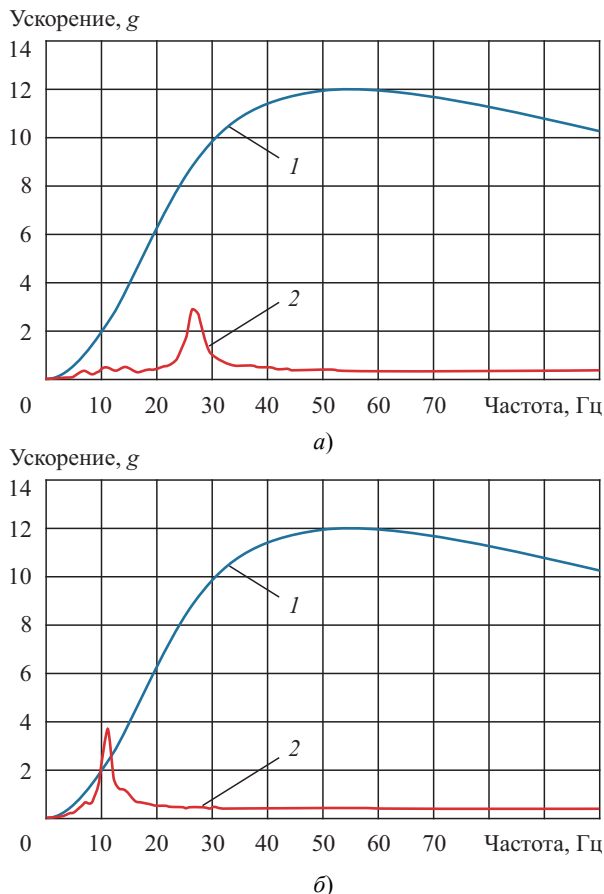


Рис. 4. Спектральное представление динамических нагрузок: а) ударостойкость обеспечена; б) ударостойкость не обеспечена. 1 – испытательное воздействие; 2 – аварийное воздействие

Fig. 4. Spectral representation of dynamic loads: а) shock resistance ensured; б) shock resistance not ensured. 1 – test impact; 2 – emergency impact

одного из элементов конструкции (обшивки, ребер или шпангоутов) однозначно приводит к разрушению конструкции в целом. Полученные в результате динамического расчета значения ускорений корпуса определяют воздействие на оборудование, воспринимающее общие сотрясения, и являются кинематической нагрузкой для определения сотрясений палубных перекрытий. Расчеты собственных частот палуб выполняются с использованием программы ANSYS.

Оценка защищенности оборудования проводилась на основе сопоставления значений фактических динамических нагрузок на оборудование с допустимыми значениями. Анализ ударных нагрузок выполняется линейно-спектральным методом (рис. 4).

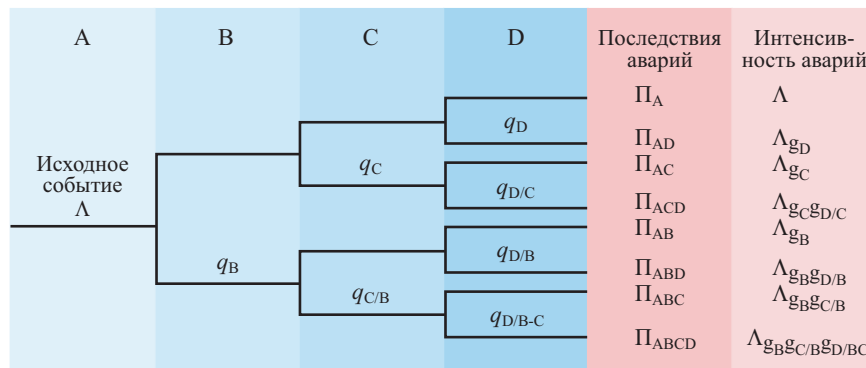


Рис. 5. Сценарии аварий, дерево событий:
 q – вероятность отказа системы;
 Λ – интенсивность исходного события

Fig. 5. Scenarios of emergencies, tree of events:
 q – system failure probability;
 Λ – intensity of initial event

Фактическая ударостойкость оборудования определяется на основе данных, представленных в технических условиях на поставку оборудования и требований РМРС к испытанию отдельного оборудования.

Следует отметить, что в настоящее время в нормативных документах РМРС и Ростехнадзора нормирование ударной стойкости оборудования судовых ЯЭУ, важного для безопасности, не оговаривается. В требованиях технического задания на реакторную установку ПЭБ и УАЛ указано, что оборудование должно выдерживать ускорения в «3g», однако данная характеристика не позволяет оценить ударостойкость оборудования. Для оценки работоспособности оборудования при динамических воздействиях необходимы данные по допустимым для конкретного оборудования ударным импульсам (допустимый ударный спектр или допустимые параметры импульса ускорений: амплитуда, форма и длительность импульса).

Учитывая, что все атомные ледоколы эксплуатируются в примерно одинаковых условиях и, согласно нормативным документам, для них определены типовые аварийные ситуации, целесообразно разработать стандартные параметры динамических воздействий, на которые должен быть рассчитан ледокол, и в соответствии с ними выполнить нормирование ударостойкости оборудования ЯЭУ, важного для безопасности.

Моделирование пожаров в помещениях судна осуществляется с использованием программы Fire [14]. Трехмерная модель судна 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 парамет-

ры пожара (среднеобъемные температуры газовой среды и температуры всех ограждающих конструкций), время распространения пожаров по помещениям. При определении отказов оборудования используется консервативный подход – оборудование считается однозначно вышедшим из строя, если температура окружающей среды превышает значение гарантированной работоспособности оборудования.

При рассмотрении вероятных путей развития аварии (последовательностей событий) может быть построено «дерево событий» (рис. 5) с учетом возможных дополнительных единичных отказов оборудования или ошибочных действий эксплуатирующего персонала. Метод «дерева событий» широко применяется в рамках вероятностного анализа безопасности для аварий реакторных установок, вызванных внутренними причинами [15]. В результате анализа развития аварии устанавливаются выведенные из строя системы, важные для безопасности ЯЭУ, и определяется конечное состояние ядерной установки.

Классификация конечных состояний ядерной установки в результате проектных и запроектных аварий осуществляется исходя из состояния целостности защитных барьеров (оболочки твэлов, границы первого контура, защитной оболочки, защитного ограждения) и наличия радиоактивных выбросов. Рассматривается пять конечных состояний (КС):

- КС 1 – нарушение нормальной эксплуатации, не переходящее в аварийную ситуацию;
- КС 2 – авария без повреждения активной зоны и без радиоактивных выбросов за пределы защитной оболочки;
- КС 3 – авария с повреждением активной зоны, но без радиоактивных выбросов за пределы защитной оболочки;

- КС 4 – авария без повреждения активной зоны, но с радиоактивными выбросами в окружающую среду;
- КС 5 – авария с повреждением активной зоны и радиоактивными выбросами в окружающую среду.

Конечные состояния ядерной установки при проектных авариях должны характеризоваться либо сохранением целостности всех защитных барьеров, либо – в случае повреждения некоторых из них – отсутствием недопустимых радиационных последствий для персонала и населения.

Для запроектных аварий определяются наиболее опасные конечные состояния, определяется суммарная вероятность аварий, приводящих к конечным состояниям, характеризующимся повреждением активной зоны или выходом радиоактивности в окружающую среду, оцениваются их радиационные последствия.

Рекомендации МАГАТЭ относительно вероятности тяжелых аварий ядерных установок формулируются следующим образом: суммарная вероятность аварий с разрушением активной зоны при радиоактивном выбросе, не превышающем допустимого уровня (локализация радиоактивных продуктов), 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. В отечественных нормативных документах [15, 16] указано, что частота серьезных повреждений активной зоны должна быть не больше 10^{-5} – 10^{-6} на 1 реактор в год, а частота значительного выброса радиоактивных веществ в окружающую среду в результате аварии реактора – не более 10^{-6} – 10^{-7} на 1 реактор в год.

Атомное судно, как правило, эксплуатируется в отдаленных арктических малонаселенных районах. При этом количество активности, накопленной 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 тяжелых аварий: серьезное повреждение активной зоны – 10^{-5} на 1 реактор в год; значительный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду – 10^{-6} на 1 реактор в год.

Анализ радиационных последствий аварий выполняется с использованием методик [17, 18],

разработанных для определения переноса активности по помещениям судна, определения радиационной обстановки на местности, обусловленной выбросом радионуклидов в атмосферу, и расчета последствий поступления радиоактивных веществ в морскую воду (В.П. Балабин, М.Н. Ганул, Н.Л. Кучин, И.В. Сергеев). При затоплении судна с поврежденным первым контуром предполагается, что происходит выход в забортное пространство всего теплоносителя первого контура, причем в морскую воду попадают все радионуклиды, содержащиеся в теплоносителе, за исключением радиоактивных газов, которые выходят в атмосферу. В дальнейшем в забортное пространство медленно поступают радионуклиды, находящиеся в ядерном топливе. Радионуклиды, выходящие из ядерного топлива, перед поступлением в забортное пространство переносятся по цепочке последовательных объемов: первый контур, защитная оболочка (ЗО), реакторный отсек. Длительное загрязнение при выходе продуктов деления из топливной композиции определяется в основном цезием-137 и стронцием-90. Проблема переноса радиоактивных нуклидов в морской воде от аварийного судна с ЯЭУ относится к задачам о нахождении поля примеси в морской среде. Пространственно-временное распределение примесей (поле концентраций) в океане имеет вид трехмерного гауссовского распределения, параметры которого определяются гидродинамическими факторами (перенос течением, турбулентная диффузия). Критериями оценки экологических последствий радиационных аварий на море являются масштабы зон акваторий, вовлеченных в послеаварийное загрязнение, где концентрации наиболее биологически значимых радионуклидов в водных массах и донных отложениях превышают контрольные значения, определяемые требованиями радиационной гигиены.

Результаты анализа безопасности УАЛ и ПЭБ при внешних воздействиях

Safety analysis results
for multi-purpose icebreaker
and floating NPP under external effects

Анализ ядерной и радиационной безопасности УАЛ и ПЭБ в случае аварийных ситуаций, вызванных внешними воздействиями на судно, взрывами и пожарами на борту, показал, что безопасность обеспечена в случае всех проектных аварий [19, 20].

Наиболее тяжелыми по радиационным последствиям являются маловероятные запроектные аварии с разрушением защитных барьеров реакторной установки в результате тарана в район реакторного отсека другим арктическим судном, скорость которого существенно больше критической (5-6 уз), или при посадке УАЛ (ПЭБ) на скалистую отмель в штормовых условиях.

Для УАЛ при выбросе радиоактивных веществ в атмосферу недопустимое прямое радиационное воздействие может иметь место на удалении до 30 км; при выходе в морскую среду продуктов деления из активной зоны радиус пятна загрязнения – около 20 км.

Для ПЭБ при выходе радиоактивных продуктов деления из активных зон протяженность пятна загрязнения составляет около 25 км, а ширина – около 8 км.

При затоплении УАЛ и ПЭБ на глубинах более 200 м нет необходимости вводить ограничения на прохождение судов над местом затопления.

Библиографический список

1. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года [утв. Президентом РФ 27 июля 2001 г. № 1387, ред. 2015 г.], 2015. С. 10.
2. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [принят Гос. Думой 20 октября 1995 г.: по состоянию на 30.11.2011 г.].
3. НП-022-2000 Основные положения обеспечения безопасности ядерных энергетических установок судов [утв. постановлением Госатомнадзора России от 27.09.2000 г. № 5] // Вестник Госатомнадзора России. 2000. № 6(12).
4. НП-029-01 Правила ядерной безопасности ядерных энергетических установок судов [утв. постановлением Госатомнадзора России от 30.03.2001 г. № 1] // Вестник Госатомнадзора России. 2001. № 2(15).
5. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
6. НП-023-2000 Требования к отчету по обоснованию безопасности ядерных энергетических установок судов [утв. постановлением Госатомнадзора России от 28.12.2000 г. № 15] // Вестник Госатомнадзора России. 2001. № 1(14).
7. Sedakov L., Vorontsov A., Kraynov A. Problems of improving safety of marine nuclear power plants, methods and ways of their solution // Судовая энергетика (на англ. яз.): Сб. статей к 100-летию ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1994. С. 56–63.
8. Воронцов А.В., Крайнов А.А., Седиков Л.П. Критерияльная оценка уровня ядерной безопасности системы «АЭУ – корабль» // Труды второй международной конференции по судостроению. ISC'98, секция D. СПб., 1998. С. 174–179.
9. Sedakov L., Vorontsov A., Kraynov A. Safety conception of marine nuclear power plant and up-to-date methodology of its substitution // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N'ocean 2000. Proceedings. Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan. February 21–24, 2000. P. 273–277.
10. НП-064-05 Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно и радиационно опасные объекты [утв. постановлением № 16 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 20.12.2005 г.: по состоянию на 01.05.2006 г.].
11. Нестеров А.Б. Решение проблем аварийной прочности и экологической безопасности судов для морской транспортировки токсичных грузов за счет совершенствования судокорпусных конструкций. Автореферат дисс....док. тех. наук. 05.08.01. СПб., 2013. 43 с.
12. Нестеров А.Б. Исследование эффективности конструктивной бортовой защиты при аварийном столкновении судов // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1984. Вып. 40. С. 46–52.
13. 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.
14. Шедько С.В. Компьютерное моделирование динамики развития корабельного пожара // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 54(338). С. 91–99.
15. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
16. ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭГ-01-011-97) Общие положения обеспечения безопасности атомных станций [утв. Постановлением № 9 Госатомнадзора России 14.11.1997 г.: по состоянию на 01.07.1998 г.].
17. Ганул М.Н., Кучин Н.Л., Платовских Ю.А., Сергеев И.В., Струев В.П. Моделирование радиационного воздействия атомных объектов морской техники в проблеме безопасности морской среды и человека. СПб.: СПбГУ, 2003.
18. Ганул М.Н., Кучин Н.Л., Сергеев И.В. Моделирование источника загрязнения морской воды при

затоплении судна, содержащего радиоактивные материалы // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 1. С. 61–71.

19. Воробьев В.М., Дульнев А.И., Кудинович И.В. и др. Анализ безопасности ядерной энергетической установки универсального атомного ледокола при внешних воздействиях // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 89(373). С. 21–35.
20. Болгаров С.П., Дульнев А.И., Кудинович И.В. и др. Анализ безопасности АЭУ плавучего энергоблока при внешних воздействиях // Наука и безопасность. 2015. № 2(15). С. 49–62.

References

1. Marine Doctrine of the Russian Federation till the year 2020. Approved by the President of the Russian Federation on July 27, 2001, No. 1387, 2015 revision. P. 10 (*in Russian*).
2. Federal Law No. 170-FZ dt. November 21, 1995. On use of nuclear energy. Adopted by the State Duma on October 20, 1995, current revision date November 30, 2011 (*in Russian*).
3. Regulatory Document NP-022-2000 Main safety provisions for marine nuclear power plants. Approved by Gosatomnadzor of Russia Directive No. 5 dt. September 27, 2000 // Vestnik Gosatomnadzora Rossii (Nuclear and Radiation Safety Journal), No. 6(12) (*in Russian*).
4. Regulatory Document NP-029-01. Nuclear safety rules for marine reactors. Adopted by Gosatomnadzor of Russia Directive No. 1 dt. March 30, 2001 // Vestnik Gosatomnadzora Rossii (Nuclear and Radiation Safety Journal), No. 2(15) (*in Russian*).
5. Rules for the Classification and Construction of Nuclear Ships and Floating Facilities. St. Petersburg, RS, 2004 (*in Russian*).
6. Regulatory Document NP-023-2000. Requirements to Safety Justification Report for marine nuclear reactors. Adopted by Gosatomnadzor of Russia Directive No. 15 dt. December 28, 2000 // Vestnik Gosatomnadzora Rossii (Nuclear and Radiation Safety Journal), No. 1(14) (*in Russian*).
7. Sedakov L., Vorontsov A., Krainov A. Problems of improving safety of marine nuclear power plants, methods and ways of their solution // Marine power engineering (*in English*). Collection of papers to 100th anniversary of Krylov Shipbuilding Research Institute. St. Petersburg, KSRI, 1994.
8. Vorontsov A., Krainov A., Sedakov L. Criterial assessment of nuclear safety level of “reactor-ship” system // Transactions of the 2nd International Shipbuilding Conference (ISC’98), Section D. St. Petersburg, 1998. P. 174–179 (*in Russian*).
9. Sedakov L., Vorontsov A., Krainov A. Safety conception of marine nuclear power plant and up-to-date methodology of its substitution // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N’ocean 2000. Proceedings. Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan. February 21–24, 2000. P. 273–277.
10. Regulatory Document NP-064-05. Consideration of natural and man-made external effects upon facilities with nuclear and radiation hazards. Adopted by Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), Directive 16 dt. December 20, 2005, current revision date May 1, 2006 (*in Russian*).
11. Nesterov A. Enhancing emergency strength and environmental safety of toxic cargo carriers by improving their hull structures. Autoabstract of Doctoral Theses, August 5, 2001. St. Petersburg, 2013, 43 pp. (*in Russian*).
12. Nesterov A. Efficiency of structural protection of ship sides in case of emergency collisions // Shipbuilding Matters. Ship Design Series. 1984. Issue 40. P. 46–52 (*in Russian*).
13. Dulnev A. Strength and concussions of ship structures due to helicopter crash landing on deck // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2005. Issue 21(305). P. 84–102 (*in Russian*).
14. Shedko S. Computer simulation of ship fire dynamics // Transactions of the Krylov State Research Institute. 2010. Issue 54(338). P. 91–99 (*in Russian*).
15. Samoylov O., Usynin G., Bakhmetyev A. Safety of marine nuclear reactors. Moscow, Energoatomizdat, 1989 (*in Russian*).
16. Regulatory Document OPB-88/97 NP-001-97 (PNAEG-01-011-97). General safety provisions for NPPs. Adopted by Gosatomnadzor of Russia, Directive 9 dt. November 14, 1997, current revision date July 1, 1998 (*in Russian*).
17. Ganul M., Kuchin N., Platovskiy Yu., Sergeev I., Struev V. Simulation of radiation impact from marine nuclear facilities in the problem of human and water medium safety. St. Petersburg State University, 2003 (*in Russian*).
18. Ganul M., Kuchin N., Sergeev I. Simulation of the source of contamination of sea water during the sinking of a ship containing radioactive materials // Atomic Energy. 2005. Vol. 98, Issue 1. P. 61–71 (*in Russian*).
19. Vorobyev V., Dulnev A., Kudinovich I. et al. Analysis of nuclear icebreaker powerplant safety under external

effects // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 89(373). P. 21–35 (*in Russian*).

20. Bolgarov S., Dulnev A., Kudinovich I. et al. Nuclear reactor of floating NPP under external effects: safety analysis // Science and Safety. 2015. No. 2(15). P. 49–62 (*in Russian*).

Сведения об авторе

Кудинович Игорь Вячеславович, д.т.н., доцент, заместитель начальника отделения – начальник отдела ФГУП

«Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-06.
E-mail: igor_kudinovich@mail.ru.

About the author

Igor V. Kudinovich, Dr. Sci. (Eng.), Associated Prof., Deputy Head of Division – Head of Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-06. E-mail: igor_kudinovich@mail.ru.

Поступила / Received: 02.11.18
Принята в печать / Accepted: 01.02.19
© Кудинович И.В., 2019