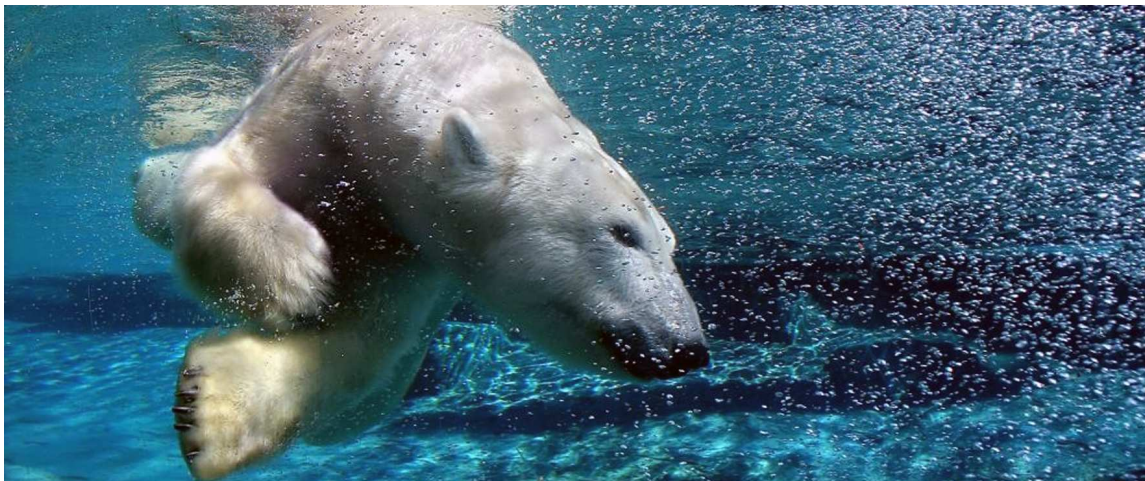




БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12
EDN DSZKDO

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПассажиРОВ И ЭКИПАЖА МАЛЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУДОВ ПО УСКОРЕНИЯМ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ: АНАЛИЗ ТРАВМАТИЗМА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, НОРМАТИВНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

А.Г. Назаров, канд. техн. наук, ООО «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: anmarineconsulting@ya.ru

С.А. Королев, инженер-конструктор, «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: sk.anmarineconsulting@ya.ru

А.С. Пентегов, инженер-исследователь, «АН Марин Консалтинг», 107113 Россия, Москва, ул. Шумкина, 20, стр. 1, пом. X/4, email: ap.anmarineconsulting@ya.ru

В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасности пассажиров и экипажа малых высокоскоростных судов при воздействии ускорений в эксплуатационных и аварийных режимах, включая столкновения. Показано, что характер травматизма определяется не только пиковыми значениями ускорений, но и их временными параметрами, прежде всего скоростью нарастания (рывком). Анализ статистики аварий (USCG, страны Юго-Восточной Азии) и сопоставление с автомобильным транспортом выявили, что для малых высокоскоростных судов характерны более длительные импульсы замедления (200–800 мс) и существенно меньшие значения рывка, что приводит к преобладанию внешних механических травм при относительно низкой доле хлыстовых повреждений шейного отдела позвоночника. Выполнен критический анализ международных и отечественных нормативных документов, показавший ограниченную применимость расчетных зависимостей HSC Code для судов малых размеров. Предложена одномерная модель продольного столкновения и проведено численное моделирование лобовых ударов типового 13-метрового катера с корпусами из стеклопластика, алюминия и стали. Установлено, что жесткость корпуса определяется преимущественно толщиной и механическими свойствами обшивки. Полученные результаты позволяют уточнить требования к компоновке пассажирских помещений, обосновать применение ограждающих конструкций вместо ремней безопасности при скоростях до 25–30 узлов и сформулировать предложения по развитию нормативной базы. Полученные результаты позволяют уточнить требования к компоновке пассажирских помещений, обосновать диапазон применения ремней, предложить направления совершенствования нормативной базы Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: высокоскоростные суда, малые суда, ускорения, безопасность, столкновение.

Для цитирования: Назаров А.Г. Обеспечение безопасности пассажиров и экипажа малых высокоскоростных судов по ускорениям при столкновениях: анализ травматизма, математическое и численное моделирование, нормативные рекомендации / А.Г. Назаров, С.А. Королев, А.С. Пентегов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 4–16. — EDN DSZKDO.

ENSURING PASSENGER AND CREW SAFETY ON SMALL HIGH-SPEED CRAFT UNDER COLLISION-INDUCED ACCELERATIONS: INJURY ANALYSIS, MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELING, AND REGULATORY RECOMMENDATIONS

A.G. Nazarov, PhD, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: anmarineconsulting@ya.ru

S.A. Korolev, Design Engineer, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: sk.anmarineconsulting@ya.ru

A.S. Pentegov, Research Engineer, AN Marine Consulting, 107113 Russia, Moscow, ul. Shumkina, 20, str. 1, pom. X/4, email: ap.anmarineconsulting@ya.ru

The paper addresses safety issues of passengers and crew on small high-speed craft subjected to accelerations under operational and emergency conditions, including collisions. It is shown that injury patterns are determined not only by peak acceleration values but also by their temporal characteristics, primarily the rate of acceleration increase (jerk). Analysis of accident statistics (USCG and Southeast Asia) and comparison with road transport indicate that small high-speed craft are characterized by longer deceleration pulses (200–800 ms) and significantly lower jerk values. This results in a predominance of external mechanical injuries, such as bruises and limb fractures, with a relatively low incidence of whiplash injuries to the cervical spine. A critical review of international and national regulatory documents revealed limited applicability of HSC Code calculation methods to small craft, as predicted accelerations are often substantially overestimated. A one-dimensional longitudinal collision model is proposed, and numerical simulations of frontal impacts of a typical 13-m craft with fiberglass, aluminum, and steel hulls were performed. It was found that hull stiffness is primarily governed by shell thickness and material properties. The results enable refinement of passenger compartment layout requirements, justify ranges for use of seat belts, and provide recommendations for improving the regulatory framework of the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: high-speed craft, small craft, accelerations, safety, collision.

For citation: Nazarov A.G., Korolev S.A., Pentegov A.S. Ensuring passenger and crew safety on small high-speed craft under collision-induced accelerations: injury analysis, mathematical and numerical modeling, and regulatory recommendations. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 4–16. EDN DSZKDO. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростные суда (ВСС) в последние десятилетия получили широкое распространение как в коммерческой, так и в служебной и частной эксплуатации. Они используются для пассажирских перевозок, патрульных и спасательных операций, а также в профессиональной деятельности, связанной с работой в прибрежных и внутренних водах. Появление мощных малогабаритных двигателей, рост скоростей, снижение водоизмещения и широкое применение легких конструкционных материалов привели к существенному изменению динамики таких судов.

Практика эксплуатации показывает, что наиболее распространенный тип аварии таких судов — столкновения с судами и препятствиями, что помимо повреждений корпуса и т.д. вызывает неблагоприятное воздействие ускорений на человека. Статистические данные свидетельствуют о высокой доле травм, связанных с воздействиями ускорений, в том числе при столкновениях и движении на волнении. Особенно уязвимыми оказываются пассажиры и члены экипажа, не имеющие адекватных средств удержания туловища.

В связи с введением впервые в практике РС требований к малым ВСС следует тщательно анализировать аварии судов рассматриваемого типа, в том числе происходящие за рубежом, где такие суда более распространены. К сожалению, подобные аварии не обходятся без человеческих жертв. На рис. 1 показаны последствия столкновения малого ВСС Rapan-5 с другим скоростным судном. На борту были граждане РФ — 20 человек госпитализировано с травмами, двое детей, сидевших в носовой части судна, погибли. Причинами трагедии являются, несомненно, ошибки судоводителя при движении в узкости и в не меньшей степени субстандартная компоновка и конструкция судна, размещение пассажиров боком к направлению движения, а также в носовой части. Удивительно, что несколькими годами ранее в том же месте произошла аналогичная авария с катамараном также из композитного материала, но благодаря отсутствию пассажиров в носовой повреждаемой зоне и размещению сидений лицом вперед никто не пострадал (см. [1]). Статистика, собранная в Юго-Восточной Азии [2], свидетельствует, что при аварии «спидботов» с традиционным продольным размещением пассажиров в случае столкновения травмы получает около 70 % находящихся на борту людей. В РФ подобные исследования на ВСС ранее не выполнялись, и данные по аварийности и травматизму

не опубликованы, хотя существующие методики [3, 4] могут быть использованы для моделирования столкновений ВСС.



Рис. 1. Последствия аварии «спидботов» на о. Пхукет в феврале 2020 г.:
а — общий вид судна; б — носовая зона повреждения, показано разрушение конструкции¹

Целью настоящей статьи является повышение безопасности малых ВСС, для чего поставлены и решены следующие задачи: выполнен анализ особенностей травматизма, обозначены опасные случаи ускорений, проанализированы действующие нормативы, рассмотрены методы оценки ускорений, выполнено численное моделирование столкновений малого ВСС, выполнено сравнение безопасности ВСС с другими видами транспорта.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Особенности травматизма при авариях на малых ВСС

Для наземного и особенно легкового автомобильного транспорта при столкновениях характерно преобладание повреждений шейного отдела позвоночника, что обусловлено реализацией коротких по времени импульсов замедления с высоким значением «рывка», приводящих к хлыстовому механизму травмы. С другой стороны, статистические данные по авариям на судах малых размеров, в частности по материалам USCG [5], демонстрируют иную структуру травматизма, несмотря на значительную долю столкновений — более 55 % среди всех аварийных событий.

Ключевым фактором, определяющим тип травм, является временная структура ускорения, а не только его пиковая величина, что можно охарактеризовать скоростью нарастания ускорения («рывком») j :

$$j(t) = da(t)/dt.$$

Для судов малых размеров длительность импульса ускорения Δt составляет 200–800 мс, а величина «рывка» составит:

$$j \approx a_{peak} / \Delta t \sim 1\text{--}10 \text{ м/с}^3.$$

При этом значительная часть энергии рассеивается за счет гидродинамического сопротивления воды, разрушения конструкции, относительного движения судна и человека как единой инерционной системы. При этом даже при сопоставимом изменении скорости системы «тело — транспортное средство» Δv , критерий повреждения позвоночника S_{ed} , определяемый по ISO 2631-5 [6], в авариях малых ВСС намного меньше, чем в автомобильных:

$$S_{ed}^{marine} \ll S_{ed}^{auto}.$$

Биомеханические последствия столкновения малых ВСС таковы, что при меньших значениях «рывка» отсутствует выраженное инерционное «отставание» головы, не формируется классический хлыстовый механизм травмы шеи, а травмирующее воздействие выражено в виде падений и ударов о элементы конструкции. Это приводит к статистическому преобладанию ран и порезов (22,2 %), переломов конечностей (20,7 %), ушибов и ссадин (12,8 %) и относительно малой доле повреждений позвоночника (1,3%), что и наблюдается в

¹ Все использованные в статье иллюстрации предоставлены авторами.

официальной статистике аварий [5]. Следует отметить, что с ростом скорости движения при резких остановках структура травматизма на ВСС может начать сближаться с автомобильной.

Таким образом, различия в статистике травм между ВСС и другими видами транспорта обусловлены различиями в динамических характеристиках ускорений. Инерционность системы «судно — пассажиры» и меньшие значения «рывка» приводят к смещению доминирующего механизма повреждений от шейного отдела к внешним механическим травмам, что должно учитываться при выборе подходов к обеспечению безопасности.

Классификация ускорений

Линейные ускорения, воздействующие на человека на борту ВСС, могут быть разложены на три взаимно перпендикулярные составляющие. Продольные ускорения возникают преимущественно при разгоне и торможении и при ударных взаимодействиях корпуса с водной поверхностью или препятствиями; поперечные — при маневрировании, а вертикальные — при движении на волнении и в некоторых случаях столкновений. Наиболее опасны с точки зрения травматизма ускорения:

- вертикальные — при движении на волнении, и связаны, например, с повреждениями позвоночника и коленных суставов. Эти ускорения характерны прежде всего для судов для профессионального использования (служебных, спасательных), которые вынуждены поддерживать высокую скорость во время миссии. Для пассажирских судов они не характерны, поскольку в правилах классификационных обществ (КО) существуют ограничения по выбору эксплуатационной скорости, а связаны лишь с комфортом пассажиров;

- горизонтальные — при столкновениях в аварийных ситуациях; на пассажирском судне они приводят к падениям и травмам пассажиров.

Таблица 1

Сравнение механизмов травматизма: автомобильный и высокоскоростной водный транспорт

Параметр / аспект	Автомобильный транспорт	Водный транспорт (малые ВСС)
Тип аварийного события	Столкновение, резкое торможение	Столкновение, удар о препятствие
Характер импульса ускорения	Короткий, жесткий	Более длительный, «мягкий»
Длительность импульса Δt	20–100 мс	200–800 мс
Пиковое ускорение a_{peak}	Высокое (5–20 g и более)	Умеренное — высокое (0,3–6 g)
Скорость нарастания (рывок) м/с ³	Очень высокая: 10^2 – 10^4	Низкая — умеренная: 1–10
Инерционное рассогласование «голова — тело»	Выраженное	Слабое или умеренное
Доминирующий биомеханизм травмы	Хлыстовая травма	Падение / удар о конструкцию
Критерий S_{ed} (ISO 2631-5)	Часто $S_{ed} > 0,8$ –1,0	Чаше $S_{ed} < 0,8$
Преобладающие травмы	Повреждения шейного отдела, позвоночника	Раны, переломы конечностей, ушибы
Доля хлыстовых травм	Высокая	Относительно низкая
Роль среды	Жесткая среда, малая диссипация энергии	Рассеивание энергии удара
Условия перехода к тяжелым травмам шеи	Практически всегда при столкновении	Маловероятно, при высоких скоростях, столкновении

Нормальные эксплуатационный разгон и торможение, как правило (если говорить о скоростях до 30–35 уз), не достигают опасных уровней [7]. В настоящей статье рассматривается продольное ускорение при столкновении $a_x = g_{coll}$, которое как раз и определяет уровень безопасности ВСС по ускорениям и соответствующие требования к архитектуре и компоновке.

Столкновение судна с препятствием можно условно разбить на две стадии.

Стадия 1 — судно входит в контакт с препятствием, проникновение и разрушение конструкций. Стратегия обеспечения безопасности — избегать размещения людей в повреждаемых зонах.

Стадия 2 — судно практически остановилось, находящиеся на судне люди и предметы продолжают движение. На этой стадии применимы следующие стратегии обеспечения безопасности: обезопасить обитаемое пространство, ограничить перемещение людей при использовании ремней, избежать травм шеи и головы, ограничить перемещение тяжелых предметов.

Результаты, полученные на натурных испытаниях

В работе [8] представлена серия измерений ускорений на натурных малых судах (не на моделях) с радиоуправлением и установленными автомобильными манекенами. Хотя исследователям не удалось выполнить полную программу (в значительном диапазоне курсовых углов столкновений не срабатывали датчики акселерометров), получены ценные материалы, из которых могут быть сделаны интересные выводы:

- судно-«мишень» более уязвимо, чем судно-«пуля»;
- измеренные горизонтальные ускорения (a_x , a_y) составляют (5...8) g;
- значительная вертикальная составляющая (a_z) для малых катеров, приводящая к катапультированию пассажиров.

Исследования [8] проводились на списанных корпусах катеров с длиной корпуса около 5–6 м, оборудованных подвесными моторами. Повторить подобные эксперименты на ВСС пассажирского назначения и большего размера не представляется возможным по экономическим причинам.

Таблица 2

Сводная таблица применения ремней безопасности на различных видах транспорта

Параметр	Легковые автомобили	Авиационный транспорт	Скоростной водный транспорт
Доминирующий механизм травмы	Хлыстовой шеи, удар о интерьер	Вертикальный подброс при турбулентности	Падение, удар о элементы конструкции
Тип аварийных ускорений	Высокие ускорения, короткие импульсы, экстремальный «рывок»	Умеренные ускорения, длительный импульс	Умеренные ускорения, длительный импульс
Обязательность ремней	Обязательны всегда	Обязательны при взлете, посадке, турбулентности	Зависит от режима эксплуатации
Роль ремня безопасности	Ключевая защита от травм шеи и вторичных травм	Предотвращение отрыва и падения	Предотвращение падений и смещений
Эффективность ограждающих конструкций без ремня	Недостаточна	Недостаточна	Может быть достаточной при определенных условиях
Возможность замены ремня ограждающими конструкциями	Нет	Нет	Да, при ограниченных режимах
Тип ремня	Трехточечный	Двухточечный поясной	Трехточечный (HSC Code) Двухточечный поясной (служебные катера)
Типичные ограждающие элементы	Подголовник, салон	Спинка кресла, подлокотники	Высокая спинка, боковые упоры, поручни, конструкция впереди
Основной риск без ремня	Тяжелые травмы шеи	Удары о потолок, падения	Переломы, раны, удары головой
Практика регулирования	Жесткое нормативное требование	Международный стандарт	Требуются HSC Code; для малых ВСС — варьируется

Изучение опыта аварий [5] и указанное разделение на стадии (1 и 2) позволяет предложить рекомендации к компоновке малых ВСС (рис. 2). Следует отметить, что большинство травм люди получают именно в стадии столкновения 2.

Если говорить о снижении травматизма, часто задаваемым вопросом является необходимость применения ремней на малых ВСС. Можно утверждать, что ограждающие конструкции могут быть эквивалентной альтернативой ремней на малых ВСС при скоростях движения до 25–30 уз (табл. 2).

Экспериментальные данные показывают, что биомеханические возможности среднестатистического человека по удержанию равновесия составляют: одной рукой — при ускорениях порядка 0,3–0,8 g; двумя руками — при ускорениях до 0,6–1,6 g. При превышении этих значений резко возрастает вероятность падений, особенно при наличии дополнительных неблагоприятных факторов.

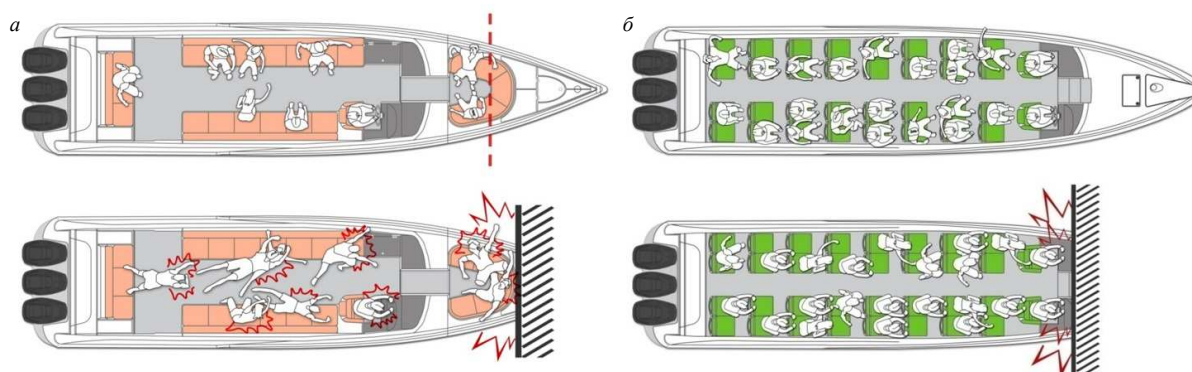


Рис. 2. Опасная (а) и безопасная (б) компоновка сидений и носовой повреждаемой зоны на малом ВСС

Подход HSC Code к безопасности по ускорениям

Исторической предпосылкой для формирования требований HSC Code [9] в части расчетных ускорений при столкновении послужили аварии высокоскоростных судов конца 1980-х гг., одной из наиболее известных среди которых является авария судна ApolloJet в Гонконге в 1989 г., когда судоводитель на скорости порядка 30 уз утратил управление, в результате чего судно выполнило неуправляемый разворот, последовательно столкнулось с двумя судами и причальным сооружением. В результате аварии погибло четыре человека, при том, что само судно было без пассажиров. Эта авария получила широкий резонанс и стала одним из катализаторов пересмотра подходов к безопасности ВСС.

Требования HSC Code можно сгруппировать следующим образом:

- заданы уровни ускорений 1 и 2 в зависимости от расчетного ускорения при столкновении g_{coll} ;
- приведены эмпирические формулы для расчета g_{coll} ;
- приведены альтернативные требования к прямому расчету ускорений — удар о недеформируемую скалу высотой 2 м, скорость удара V_{imp} составляет 0,6 от эксплуатационной V_m ;
- приведены требования к компоновке пассажирских помещений и размещению таранной переборки в зависимости от уровня ускорений (табл. 3);
- в приложениях HSC Code [9] обозначены опасные уровни ускорений для различных видов активностей, которые могут быть использованы при оценке безопасности в ходе испытаний судна.

Формулы для ускорений при столкновении g_{coll} , используемые в HSC Code [9] (в настоящей работе не воспроизводятся), были разработаны в начале 1990-х гг. в рамках работы британской и австралийской рабочих групп по высокоскоростным судам. Эти формулы не являются результатом строгого физического моделирования процессов деформации корпуса и взаимодействия судна с препятствием, а представляют собой итог некоего «политического компромисса» участников групп. В результате возникают ситуации, когда для судов с меньшей скоростью расчетные ускорения оказываются выше, чем для более быстроходных судов аналогичных размеров, что указывает на ограниченную применимость методики.

Формулы для g_{coll} , положенные в основу требований HSC Code, изначально предназначались для относительно крупных ВСС и не разрабатывались с учетом особенностей малых размерений. Применение данных формул к малым ВСС приводит к дополнительным искажениям расчетных результатов. Так, в работе [10] показано, что все суда водоизмещением до 200 т попадают в уровень ускорений 2.

Указанные обстоятельства послужили основанием для критического анализа применимости методики HSC Code к малым ВСС и стали одной из причин проведения численных исследований столкновений, результаты которых приведены в последующих разделах статьи. Полученные в ходе моделирования данные позволяют оценить степень консерватизма нормативных требований и уточнить область их обоснованного применения.

Таблица 3

Требования HSC Code [9] к компоновке пассажирского судна

Уровень ускорений	Требования к компоновке
Уровень 1: $g_{coll} < 3 g$	без ремней, диваны, любое направление сидений, столы
Уровень 2: $g_{coll} = 3-12 g$	ремни, сиденья одобренного типа лицом вперед/назад, киоски и бары в корму от переборок, багаж и т.д.

Анализ требований зарубежных и международных стандартов

SCV Code [11], разработанный ИМО для стран Карибского бассейна, признает возможность безопасной перевозки даже стоящих пассажиров на коротких маршрутах и при ограниченных уровнях ускорений, при этом определяет длину поручня и ширину сиденья на каждого пассажира.

Австралийский стандарт NSCV [12] допускает наличие стоящих пассажиров в салоне при продолжительности маршрута менее 60 минут. Интересен подход к определению положения таранной переборки в зависимости от энергетического коэффициента C_E , зависящего от полного водоизмещения, максимальной скорости и длины подразделения на отсеки.

Финский стандарт VTT [13] предусматривает обязательное наличие сиденья для каждого пассажира, однако требования к конструкции сидений и применению удерживающих устройств существенно менее жесткие.

Таблица 4

Сравнительный анализ подходов

Документ	Ориентация кресел	Ремни безопасности	Стоячие пассажиры	Жесткость требований
HSC Code [9]	Любое (Level 1) Строго в нос/корму (Level 2)	Не требуются Обязательны	Не допускаются	Очень высокая
VTT [13]	Не всегда обязательна	Нет требований	Как правило, нет	Средняя
SCV Code [11]	Допускается вариативность	Нет требований	Допускаются	Умеренная
NSCV [12]	Вариативная	Нет требований	Допускаются (≤ 60 мин)	Умеренная
ISO Small Craft [14]	Не регламентируется жестко	Нет требований	Зависит от типа судна	Базовая

Стандарт ISO 15085 [14] для малых судов прогулочного и профессионального использования ориентирован в первую очередь на нормальную эксплуатацию, а не столкновения. Вводится понятие «скоростного» судна (high-speed boat), скорость которого v определяется по формуле:

$$v \geq \max \{ 10\sqrt{L_h}; 25 \text{ уз} \}.$$

Эти суда, независимо от проектной категории, должны быть оснащены средствами опоры тела для каждого человека на борту с целью снизить риск падения человека за борт при резких поворотах, ускорениях или качке; риск падений внутри рабочей палубы или кокпита не рассматривается, приведена методика тестирования кресел. Для каждого человека должен быть выбран один из следующих вариантов:

- один поручень в сочетании с дополнительной опорой тела;
- два поручня, обеспечивающие одновременный захват обеими руками (допускается использование одного поручня, если он позволяет захват двумя руками с расстоянием между ними не менее 200 мм).

Для сидящих пассажиров опора (спинка или подлокотники) должна иметь высоту не менее 120 мм над жестким основанием сиденья или над полностью сжатой подушкой, если таковая установлена.

Для стоящих или опирающихся людей опора тела может обеспечивать поддержку только спины или туловища. При жокейской посадке опора тела может обеспечиваться за счет упора коленями.

Анализ требований различных нормативных документов (табл. 4) показывает, что HSC Code [9] (обязательный для ВСС, совершающих международные рейсы) использует наиболее консервативный и жесткий подход к обеспечению безопасности пассажиров, основанный на расчетных ускорениях при столкновении. В то же время стандарты, ориентированные специально на малые суда и реальные условия эксплуатации [11–14], допускают более гибкие решения в части размещения экипажа и пассажиров, отсутствует жесткая привязка к экстремальным аварийным сценариям столкновения.

Математическая модель столкновения судна с препятствием

Для анализа динамики судна при столкновении с неподвижным препятствием рассмотрим одномерную модель продольного движения (рис. 3). Используемый подход аналогичен методике, широко применяемой при анализе дорожно-транспортных происшествий наземного транспорта [15]. В теории столкновения автомобилей сила реакции при ударе описывается законом Гука $F=kx$, где размерный коэффициент жесткости k характеризует степень поглощения энергии деформируемых зон кузова.

Экспериментально установлено [15], что при лобовых столкновениях автомобилей коэффициент k может рассматриваться как постоянная величина для конструкции одного типа (т.е. модели автомобиля) и не зависит от скорости удара в рассматриваемом диапазоне.



Рис. 3. Система координат и схема сил, действующих на судно при столкновении

Уравнение движения судна в продольном направлении может быть записано в следующем виде:

$$(M + m_{xx}) \frac{d^2x}{dt^2} = T(v, n, r) - R(v) - kx, \quad (1)$$

где M — масса судна;

m_{xx} — присоединенная масса при движении вдоль продольной оси;

x — продольное перемещение судна;

$T(v, n, r)$ — тяга двигателей, зависящая от скорости v , частоты вращения n и параметра реверсирования r ;

$R(v)$ — гидродинамическая сила сопротивления;

k — коэффициент жесткости, определяемый конструкцией корпуса.

В первом приближении примем следующие допущения:

- сила сопротивления движению R в момент удара пренебрежимо мала;
- тяга двигателей T в момент контакта с препятствием отсутствует;
- присоединенная масса m_{xx} мала по сравнению с M .

С учетом указанных допущений уравнение (1) принимает вид:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -kx. \quad (2)$$

Решение уравнения движения (2) для начальных условий $t=0$, $x(0)=0$, $dx/dt(0)=V_0$ имеет следующий вид:

$$x(t) = V_0 \sqrt{M/k} \sin(\sqrt{k/M} \cdot t), \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_0 \cos(\sqrt{k/M} \cdot t), \quad (4)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -V_0 \sqrt{M/k} \sin(\sqrt{k/M} \cdot t). \quad (5)$$

Полученные зависимости позволяют определить перемещение, скорость и ускорение судна в любой момент времени при известном значении коэффициента жесткости k .

Коэффициент жесткости корпуса k зависит от материала корпуса, толщины обшивки, конструктивной схемы набора, локальной деформируемости носовой части. Поскольку проведение натурных ударных испытаний на реальных судах практически невозможно, определение значения коэффициента k выполнялось методом численного моделирования столкновений с использованием специализированного программного обеспечения.

Численное моделирование столкновений малых ВСС

Численное моделирование столкновений высокоскоростных малых судов (рис. 4–6) выполнялось в рамках исследований, направленных на совершенствование нормативных требований в области безопасности и уточнение методик оценки ускорений, воздействующих на пассажиров и экипаж. Основными целями численного моделирования являлись:

- проверка адекватности нормативных оценок ускорений для малых ВСС;
- анализ влияния скорости судна и конструктивного исполнения корпуса на величину ускорений при столкновении;
- формирование базы данных для последующего совершенствования нормативных требований.

В качестве объекта исследования рассматривался скоростной катер длиной порядка 13 м и водоизмещением около 13 т, что соответствует типичному представителю класса малых ВСС. Расчетные сценарии включали столкновение судна с жесткой вертикальной стеной на скоростях $V_{imp}=5, 10$ и 15 м/с. Выбранный диапазон скоростей охватывает умеренные и высокоскоростные режимы движения, что позволило проанализировать изменение характера взаимодействия судна с препятствием в зависимости от кинетической энергии удара.

Для оценки влияния конструктивных факторов в расчетных моделях рассматривались различные варианты корпусных конструкций, отличающиеся:

- материалом корпуса (сталь, алюминиевые сплавы, композитные материалы);
- толщиной элементов обшивки («усиленная» и «легкая» конструкции).

Такой подход позволил количественно оценить роль деформируемости корпуса в процессе столкновения и выявить связь между характером поглощения энергии удара и величиной ускорений, действующих на судно. В основе численного моделирования методом конечных элементов лежит анализ движения репрезентативной части судна в нелинейной динамической постановке (рис. 4, 5).

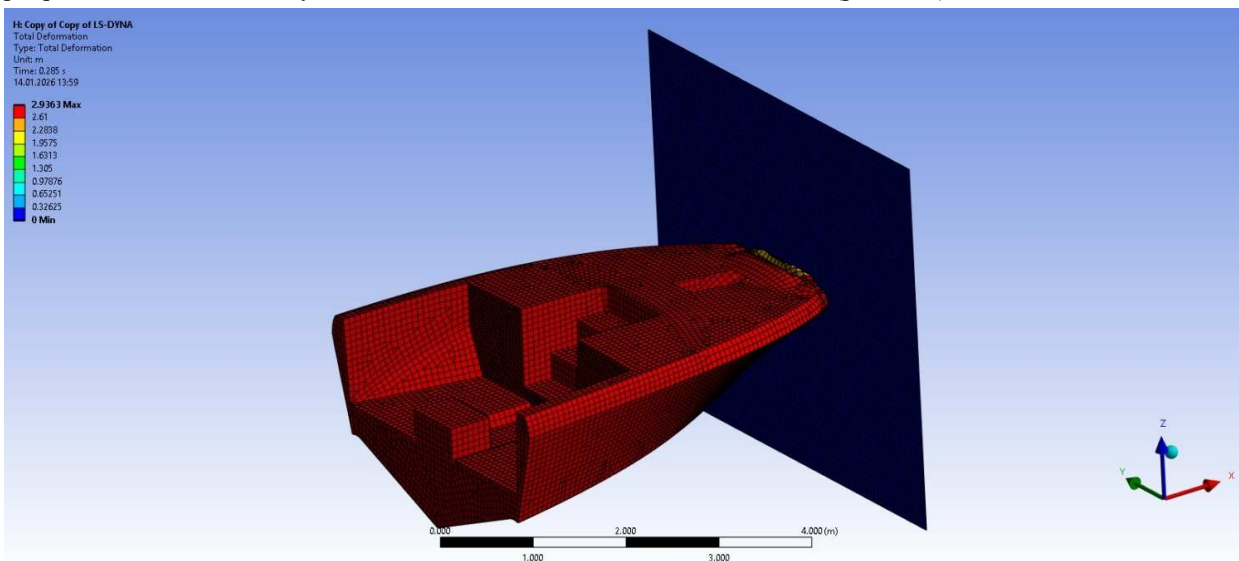


Рис. 4. Поля перемещений модели в конечный момент столкновения

Рассматриваемый сценарий лобового столкновения с вертикальной стеной, принятый в HSC Code [9], является предельно консервативным и используется как эталонный случай при оценке ускорений.

Результаты численного моделирования показали (рис. 6), что величина ускорений при столкновении определяется не только скоростью судна, но и в значительной степени конструктивными характеристиками корпуса. Для носовых конструкций малых ВСС, обладающих меньшей жесткостью и большей способностью к энергопоглощению при ударе, процесс торможения судна растягивается во времени, что приводит к снижению пиковых значений ускорений.

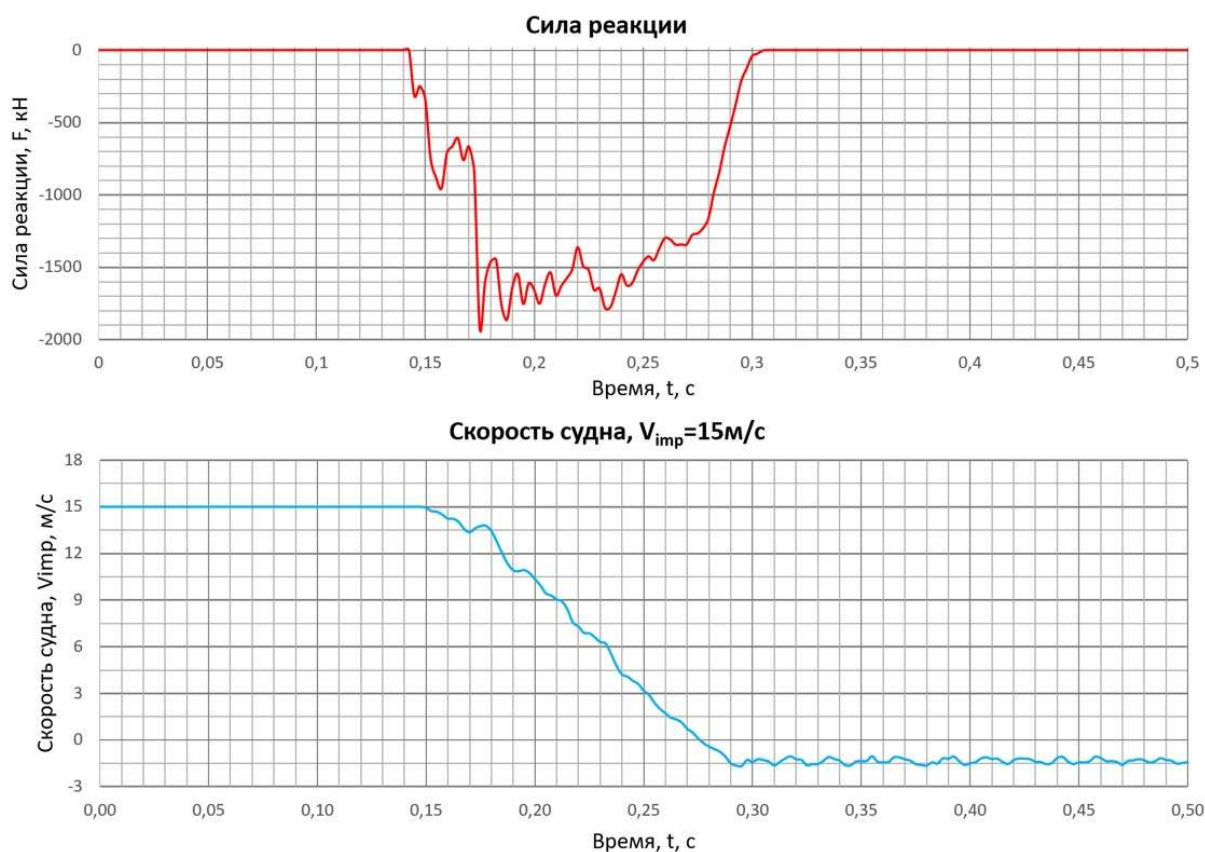
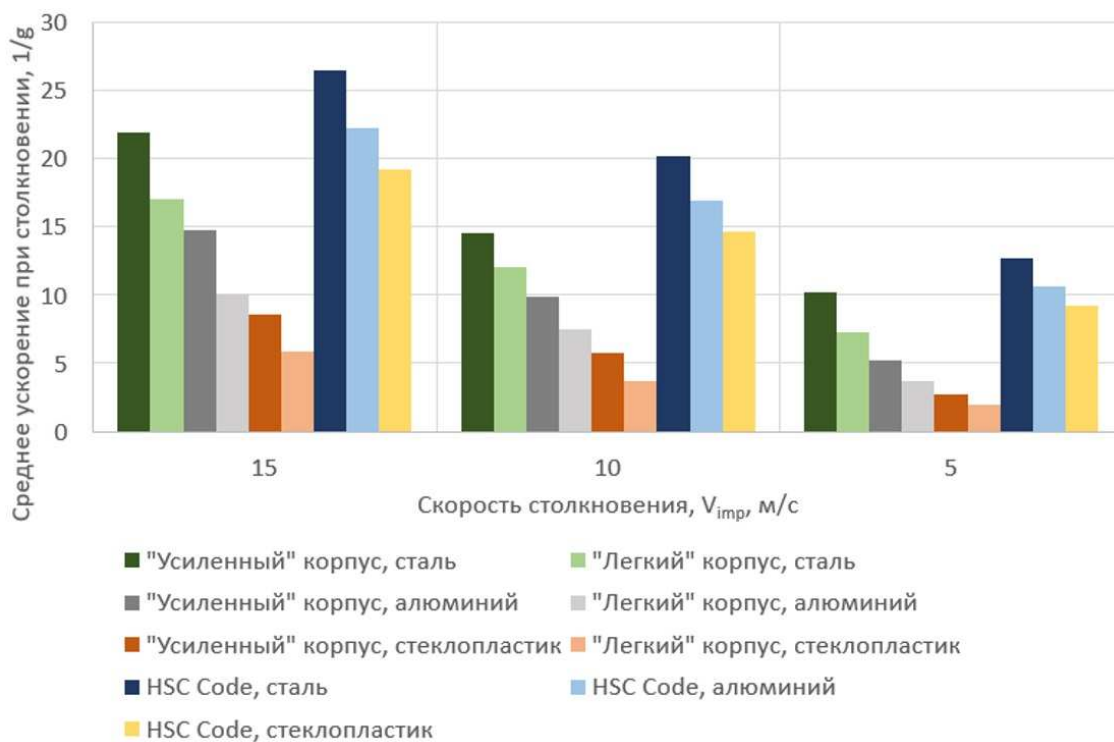
Рис. 5. Пример результатов численного анализа в виде графиков силы реакции F и скорости судна V_{imp} от времени t 

Рис. 6. Значения ускорений по результатам численного моделирования

Таблица 5

Результаты численного моделирования столкновения

Материал корпуса	Толщина, мм	Скорость столкновения, м/с	$k \cdot 10^{-3}$, Н/м
Стеклопластик	5	5–15	371,1
Стеклопластик	8	5–15	780,8
Алюминий	5	5–15	1310,8
Алюминий	8	5–15	2520,5

Определение величины коэффициента жесткости

Результаты численного моделирования использованы для определения величины k в форме, соответствующей уравнениям (3)–(5) (см. табл. 5). Анализ результатов показывает, что для корпуса, выполненного из одного материала и в пределах одинаковой толщины, коэффициент жесткости k может быть принят постоянным в диапазоне исследуемых скоростей столкновения. При этом расхождение между средними ускорениями, полученными путем численного моделирования и теоретическим решением с использованием полученных значений k , составляет от 0,7 до 7,4 %, что подтверждает адекватность предложенной модели. В последующем планируется выполнить дальнейшие работы по численному моделированию, для уточнения зависимости этого коэффициента от толщины и свойств материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе выполнен комплексный анализ вопросов обеспечения безопасности пассажиров и экипажа малых ВСС с точки зрения ускорений, возникающих при аварийных столкновениях. Показано, что именно ускорения и их временные характеристики, а не только абсолютные значения скорости судна, являются определяющим фактором риска травматизма.

Анализ статистических данных аварийности подтверждает, что контактные аварийные сценарии доминируют в структуре происшествий с ВСС. Столкновения составляют значительную долю всех аварий ВСС и практически полностью определяют случаи гибели людей [16]. Это обстоятельство подчеркивает необходимость количественной оценки ускорений и разработки инженерных мер, направленных на снижение последствий воздействия инерционных нагрузок на человека.

Динамика столкновений малых ВСС существенно отличается от аналогичных процессов в наземном транспорте. Для судов характерны более длительные импульсы замедления и меньшие значения «рывка», что приводит к иной структуре травматизма. Доминирующим механизмом повреждений являются падения и удары о элементы судовой конструкции, тогда как хлыстовые травмы шейного отдела позвоночника встречаются значительно реже. Данное обстоятельство принципиально важно при разработке требований к архитектуре пассажирских помещений и систем удержания людей.

Проведенный анализ действующих международных и национальных нормативных документов показал существенные различия в подходах к обеспечению безопасности по ускорениям. Наиболее жестким и консервативным является подход HSC Code, в то время как стандарты, ориентированные на малые суда и реальные эксплуатационные условия, допускают более гибкие компоновочные решения. Выявлены ограничения применимости методик HSC Code к судам малых размеров, для которых данные формулы изначально не разрабатывались.

Численное моделирование столкновений малых ВСС показало, что величина ускорений при ударе определяется не только скоростью движения, но в значительной степени конструктивными характеристиками корпуса. Материал и толщина обшивки оказывают решающее влияние на процесс поглощения энергии удара и продолжительность торможения судна. Показано, что расчетные значения ускорений при столкновении, определяемые по методике HSC Code, во многих случаях более чем вдвое превышают значения, полученные при численном моделировании малых ВСС (рис. 6). Установлено, что для судов одной конструкции, выполненных из одного материала и имеющих одинаковую толщину обшивки, коэффициент жесткости k корпуса при столкновении может рассматриваться как постоянная величина (табл. 5).

Правила РС по ВСС [17, ч. XXII], предусматривающие скоростные диапазоны эксплуатации и связанные с ними требования к компоновке пассажирских помещений, в целом адекватно согласуются с результатами выполненного численного моделирования. Это подтверждает корректность выбранного направления

развития нормативной базы. Можно рассматривать возможность применения альтернативных мер обеспечения безопасности пассажиров, включая использование ограждающих и ограничивающих конструкций вместо ремней безопасности.

Результаты исследования подтверждают целесообразность дальнейшего развития численных методов моделирования столкновений с целью уточнения зависимости коэффициента жесткости от толщины и механических свойств материала, а также расширения модели на пространственную постановку задачи с учетом асимметричных повреждений и особенностей многокорпусных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров А.Г. Особенности обеспечения непотопляемости малых судов / А.Г. Назаров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 38–49.
2. Latorre R.G. Functionality and safety of small passenger craft: Some lessons / R.G. Latorre, A. Nazarov // 5th Chesapeake Power Boat Symposium 2016.
3. Васильев Р.В. Численное моделирование процессов деформирования корпусных конструкций при столкновении судов: дисс. ... канд. техн. наук / Р.В. Васильев; СПбГМТУ. — СПб., 2013.
4. Тряскин В.Н. Методика и алгоритм определения допустимых скоростей при ударе судна вертикальным бортом о кромку ледяного поля / В.Н. Тряскин, В.С. Мороз // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 48–55.
5. Recreational Boating Statistics 2022. Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security, U.S. Coast Guard, Office of Auxiliary and Boating Safety, 2023. COMDTPUB P16754.36.
6. ISO 2631-5:2018 Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. Ed. 2. — 2018.
7. Kamath P. Design and construction of SM16 fast interceptor craft: Case study / P. Kamath, A. Nazarov // Warship 2013: Minor Warships — 12–13 June 2013, Bath, UK. — P. 131–139.
8. Lucas S.R. Biomechanical assessment of small craft collisions / S.R. Lucas, J.C. McGowan, R.S. Salzar, C. Planchak, J.E. Getz // 2nd Chesapeake Power Boat Symposium 2010. — P. 1–12.
9. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) / International Maritime Organization. — 2008.
10. Назаров А.Г. Особенности применения требований Международной конвенции безопасности высокоскоростных судов к судам малых размеров / А.Г. Назаров // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78(1). — С. 201–211. — DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.466>.
11. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean / International Maritime Organization. — 2017.
12. NSCV (National Standard for Commercial Vessels) / Australian Maritime Safety Authority. — 2016.
13. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2 / VTT Expert Services Ltd. — Finland, 2016.
14. ISO 15085:2024 Small craft — Protection from falling overboard and means of reboarding. Ed. 2. — 2024.
15. Noon R.K. Engineering analysis of vehicular accidents / R.K. Noon. — Boca Raton: CRC Press, 1994.
16. Antão P. Analysis of high-speed craft accidents / P. Antão, C. Guedes Soares // Safety & Reliability. — 2003. — Vol. I. — P. 37–44.
17. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.

REFERENCES

1. Nazarov A.G. Specifics of providing unsinkability for small craft. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 38–49. (In Russ.)
2. Latorre R.G., Nazarov A. Functionality and safety of small passenger craft: Some lessons. *5th Chesapeake Power Boat Symposium*. Annapolis, USA, 2016.
3. Vasiliev R.V. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniya korpusnykh konstruktssii pri stolknovenii sudov [Numerical modeling of deformation processes of hull structures during ship collisions: PhD thesis] / St. Petersburg State Marine Technical University. St. Petersburg, 2013.
4. Tryaskin V.N., Moroz V.S. Methodology and algorithm for determination of permissible speeds at a ship's vertical side crash against the ice field edge. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 47–55. (In Russ.)
5. Recreational Boating Statistics 2022. Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security, U.S. Coast Guard, Office of Auxiliary and Boating Safety, 2023. COMDTPUB P16754.36.
6. ISO 2631-5:2018. Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks. Ed. 2, 2018.
7. Kamath P., Nazarov A. Design and construction of SM16 fast interceptor craft: Case study // WARSHIP 2013: Minor Warships, 12–13 June 2013, Bath, UK. P. 131–139.
8. Lucas S.R., McGowan J.C., Salzar R.S., Planchak C., Getz J.E. Biomechanical assessment of small craft collisions. *2nd Chesapeake Power Boat Symposium 2010*. P. 1–12.

9. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) / International Maritime Organization. 2008.
10. Nazarov A.G. Specifics of application of requirements of International Code on Safety of High-Speed Craft to small craft. *Russian Journal of Water Transport*. 2024. No. 78(1). P. 201–211. DOI: 10.37890/jwt.vi78.466. (In Russ.)
11. Code of Safety for Small Commercial Vessels Operating in the Caribbean / International Maritime Organization. 2017.
12. NSCV (National Standard for Commercial Vessels) / Australian Maritime Safety Authority, 2016.
13. Guidelines for Commercial Craft. Version 2016.2 / VTT Expert Services Ltd. Finland, 2016.
14. ISO 15085:2024 Small craft — Protection from falling overboard and means of reboarding. Ed. 2, 2024.
15. Noon R.K. Engineering analysis of vehicular accidents. Boca Raton: CRC Press, 1994.
16. Antão P., Guedes Soares C. Analysis of high-speed craft accidents. *Safety & Reliability*. 2003. Vol. I. P. 37–44.
17. Rules for the Classification and Construction of High-Speed Craft / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026.

Принята к публикации 20.02.2026.