

УДК 629.5.015.4

DOI: 10.37890/jwt.vi87.697

Оценка предельной и остаточной прочности корпуса судна

С. А. Огай

Л. Ч. Тхинь

*Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского,
г. Владивосток, Россия*

Аннотация. Общие структурные правила, разработанные Международной ассоциацией классификационных обществ (МАКО), устанавливают пошагово-итерационный метод в качестве одного из стандартных методов оценки предельной/остаточной прочности корпуса судна в неповрежденном и поврежденном состояниях. Положение нейтральной оси (НО) поперечного сечения этим методом определяется на каждом шаге увеличения кривизны из условия равновесия сил (УРС). Однако в случае неравномерного распределения нагрузки или повреждений из-за столкновений/посадки на мель, приводящих к возникновению асимметрии поперечного сечения корпуса судна, НО совершает как поступательное движение, так и вращательное движение одновременно. В настоящей работе вращательное движение НО учтено условием векторного равновесия сил (УРВС), а алгоритм SLSQP (*Sequential Least Squares Quadratic Programming*) используется для одновременного определения двух движений НО. Полученные результаты численных расчетов для контейнеровоза (прямое плавание, неповрежденный корпус) хорошо согласуются с существующими методами, включая методы, описанные в отчетах Международного конгресса по корабельным и морским сооружениям (ISSC). Исследовано влияние угла поворота НО на предельную/остаточную прочность при различных углах крена судна. Благодаря улучшенной скорости сходимости и требуемой точности алгоритма SLSQP, предлагаемый метод может быть использован для быстрой и рациональной оценки прочности корпуса судна в неблагоприятных условиях.

Ключевые слова: пошагово-итерационный метод, нейтральная ось, кривизна, остаточная прочность, предельная прочность, алгоритм SLSQP.

Assessment of the ultimate and residual strength of a ship's hull

Sergei A. Ogay

Le Tr. Thinh

Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. The Common Structural Rules (CSR) developed by the International Association of Classification Societies (IACS) stipulate the incremental-iterative method as one of the standard methods for assessing the ultimate/residual strength of an intact or damaged ship's hull. Based on the force equilibrium condition (FEC), the position of the neutral axis (NA) of the cross-section is determined at each increment of curvature. However, in cases of non-uniform loading or damage due to collision/grounding, which lead to asymmetry in the ship's hull cross-section, the NA undergoes both translational and rotational motion simultaneously. To account for the rotational motion of the NA, the force equilibrium condition is extended to a vector equilibrium condition (VEC), and the Sequential Least Squares Quadratic Programming (SLSQP) algorithm is employed to simultaneously determine both motions of the NA. For a container ship under upright, intact condition, the numerical calculation results show good agreement with existing methods, including those outlined in the reports of the International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC). The influence of the NA rotation angle on the ultimate/residual strength at various ship heel angles is discussed. Owing to the improved convergence rate and required accuracy of the SLSQP algorithm, the proposed method can be used for a rapid and rational assessment of hull strength under adverse conditions.

Keywords: incremental-iterative method, neutral axis, curvature, residual strength, ultimate strength, SLSQP algorithm.

Введение

Разрушение корпуса судна является наиболее катастрофическим видом отказа, поскольку оно почти всегда приводит к полной потере судна. Корпус судна может разрушиться, если его максимальная несущая способность (или предельная прочность корпуса) недостаточна для восприятия приложенных к нему нагрузок. Наиболее типичным последствием разрушения корпуса является перелом судна на две части под действием экстремальных вертикальных изгибающих моментов, превышающих предельную прочность корпуса. Предотвращение разрушения корпуса является важнейшей задачей при оценке безопасности судовых конструкций. Существующие методы оценки предельной прочности корпуса могут быть разделены на две группы: простые и продвинутые [1].

Простые методы включают метод начального пластического изгибающего момента, метод упругого анализа и метод, основанный на предполагаемом распределении напряжений. Метод предполагаемого распределения напряжений был первоначально предложен Caldwell [2] и впоследствии усовершенствован Paik и Mansour [3] с использованием уточненных распределений напряжений по поперечному сечению для расчета предельной прочности корпуса. Улучшенная версия метода Paik и Mansour (модифицированный метод P-M) была разработана для учета распространения зоны пластичности, в которой высота зоны текучести при осевом растяжении и высота зоны разрушения при осевом сжатии определяются с использованием итерационного метода проб и ошибок [4]. Эти методы доказали свою полезность для прогнозирования предельной прочности корпуса. Однако недостатком этих методов является то, что они не учитывают снижение несущей способности после достижения предельной прочности каждого отдельного структурного элемента.

К продвинутым методам относятся пошагово-итерационный метод (также известный как метод Smith), метод конечных элементов (МКЭ) и метод идеализированных структурных единиц (ISUM).

МКЭ, позволяющий одновременно учитывать потерю устойчивости, текучесть и смешанные виды разрушения пластин и подкрепленных панелей, образующих корпус, считается наиболее надежным методом для расчета предельной прочности корпуса как в неповрежденном, так и в поврежденном состоянии. Однако он требует значительных вычислительных затрат при увеличении масштаба анализа. Это связано с тем, что обычный МКЭ включает в себя большое количество неизвестных физических величин в узлах конечных элементов, а итерационные вычисления, необходимые для решения нелинейных уравнений жесткости, занимают значительное количество времени. Кроме того, достоверность результатов МКЭ в значительной степени зависит от квалификации и знаний инженера [5].

ISUM решает проблему вычислительных затрат времени, сохраняя при этом приемлемую точность расчетов. ISUM был разработан Ueda и Rashed [6] с использованием крупногабаритных структурных элементов, в которых нелинейное поведение каждого элемента формулируется явно с помощью прямых соотношений «нагрузка-укорочение» в виде прямой матрицы. На основе ISUM была разработана компьютерная программа – код ALPS, позволяющий существенно сократить усилия по моделированию с учетом начальных геометрических несовершенств и остаточных напряжений [7].

Smith [8] предложил пошагово-итерационный метод для проведения анализа прогрессирующего разрушения поперечного сечения корпуса, испытывающего продольный изгиб; этот метод в настоящее время обычно называют методом Smith. В методе Smith поперечное сечение корпуса судна разделяется на элементы. Перед проведением анализа прогрессирующего разрушения определяются усредненные

зависимости «напряжение-деформация» ($\sigma - \varepsilon$) для каждого отдельного элемента под осевой нагрузкой с учетом влияния пластичности и потери устойчивости. Используя предварительно установленные зависимости $\sigma - \varepsilon$ для каждого элемента, изгибающий момент определяется при последовательном увеличении кривизны, а предельная прочность получается, как максимальное абсолютное значение кривой изгибающего момента. Было проведено значительное количество исследований по методу Smith, и результаты были представлены и детально проанализированы в [1, 9, 10]. По сравнению с другими продвинутыми методами, метод Smith позволяет проводить анализ с более простым моделированием, требует меньшего времени вычислений, а его точность является удовлетворительной, благодаря чему он получил широкое распространение в предварительном проектировании и исследованиях [11].

Общие структурные правила для балкеров и нефтеналивных танкеров [11], издаваемые Международной ассоциацией классификационных обществ (МАКО), устанавливают метод Smith в качестве одного из стандартных методов оценки предельной прочности корпуса как в неповрежденном, так и в поврежденном состоянии. Предельная прочность корпуса в поврежденном состоянии определяется МАКО как остаточная прочность. Кривые $\sigma - \varepsilon$ для каждого отдельного элемента, полученные с помощью аналитических выражений. Новые положения НО поперечного сечения корпуса при последовательном увеличении кривизны определяются Smith [8] и МАКО [11] через условие равновесия сил (УРС). УРС показывает, что сумма сжимающих сил должна быть равна сумме растягивающих сил по поперечному сечению корпуса на каждом шаге увеличения кривизны. УРС доказало свою эффективность в отслеживании поступательного смещения НО и определении ее мгновенного положения для неповрежденного судна. Однако во многих случаях из-за субъективных человеческих ошибок, приводящих к неравномерному распределению веса груза во время погрузки/разгрузки, или когда конструкция корпуса судна повреждается в случае столкновения и посадки на мель, разлива нефти или поступления воды в поврежденный отсек, возникает асимметрия поперечного сечения корпуса, что в большинстве случаев вызывает крен судна. Вследствие геометрической и нагрузочной асимметрии мгновенная НО поврежденного поперечного сечения на каждом шаге увеличения кривизны не только смещается поступательно, но и поворачивается, и пренебрежение этим поворотом приводит к неточным оценкам.

На основе уравнения жесткости, использующего теорию конечных элементов в сочетании с чисто приращенной (без итераций) процедурой на каждом шаге нагружения при достаточно малом приращении кривизны, Fujikubo и др. [12] предложили явное выражение для угла поворота и поступательного смещения НО несимметричного поперечного сечения корпуса судна, испытывающего двухосный изгиб. Choung и др. [13] исследовали остаточную прочность асимметрично поврежденного танкера путем объединения условия векторного равновесия сил (УВРС) и УРС. Два фиксированных коэффициента сходимости для условий УРС и УВРС были использованы для определения поступательного смещения и угла поворота НО на каждом шаге увеличения кривизны. Однако практически не была раскрыта информация о применяемой итерационной стратегии и процессе решения для определения положения НО.

В данном исследовании используется пошагово-итерационный метод (метод Smith) МАКО [11], для оценки предельной/остаточной прочности корпуса судна. Для определения положения НО на каждом шаге увеличения кривизны несимметричного поперечного сечения на основе УРС и УВРС применяется алгоритм SLSQP (Sequential Least Squares Programming) [14], обеспечивающий высокую скорость сходимости и требуемую точность минимизации. Контейнеровоз, приведенный в отчетах Международного конгресса по корабельным и морским сооружениям (ISSC)

[1, 10], взят для анализа его предельных изгибающих моментов как в неповрежденном состоянии, так и в условиях предварительно заданных повреждений. Сначала предельная прочность корпуса неповрежденного судна в случаях прогиба (sagging condition) и перегиба (hogging condition) при прямом плавании сравнивается с результатами, приведенными в отчетах ISSC [1, 10]. Наконец, предельная прочность корпуса и движение НО при различных углах поперечного крена анализируются для состояний неповрежденного и остаточная прочность корпуса – для состояний поврежденного с целью исследования влияния поворота НО.

Метод анализа

Пошагово-итерационный метод МАКО [11]. При применении процедуры обычно принимаются следующие допущения: предельная прочность рассчитывается для поперечного сечения корпуса между двумя смежными поперечными связями; поперечное сечение корпуса остается плоским на каждом шаге приращения кривизны; материал корпуса обладает упруго-пластическими свойствами; элементы считаются работающими независимо друг от друга. Основные этапы процедуры суммированы ниже (см. блок-схему на рис. 2а).

Этап 1: Разделить поперечное сечение корпуса судна на набор элементов.

Этап 2: Определить зависимости $\sigma - \varepsilon$ для всех элементов с помощью аналитических выражений.

Этап 3: Инициализировать кривизну χ и НО для первого шага приращения.

Этап 4: Рассчитать соответствующие деформации σ и напряжения ε для каждого элемента.

Этап 5: Определить положение НО на каждом шаге приращения кривизны χ на основе УРС.

Этап 6: Рассчитать соответствующий изгибающий момент M путем суммирования вклада всех элементов.

Этап 7: Сравнить изгибающий момент на текущем шаге приращения с моментом на предыдущем шаге. Если наклон кривой $M - \chi$ меньше определенного отрицательного значения, завершить процесс и определить максимальное абсолютное значение – предельный изгибающий момент M_U . В противном случае, увеличить кривизну на величину $\Delta\chi$ и вернуться к этапу 4.

Положение НО на каждом шаге приращения кривизны χ определяется из УРС следующим образом:

$$f = \left| \frac{F_c - F_t}{F_c + F_t} \right| = \delta_1, \tag{1}$$

$$F_c = \sum \sigma_i(\chi) \cdot A_i \text{ с } \sigma_i > 0,$$

$$F_t = \sum \sigma_i(\chi) \cdot A_i \text{ с } \sigma_i < 0,$$

где F_c – суммарная сжимающая сила всех укороченных элементов; F_t – суммарная растягивающая сила всех удлиненных элементов; $\sigma_i(\chi)$ – сжимающее (растягивающее) напряжение каждого элемента на каждом шаге приращения кривизны χ ; A_i – площадь каждого элемента. В случае перегиба корпуса структурные элементы выше НО испытывают удлинение (отрицательная деформация), в то время как элементы ниже НО укорачиваются (положительная

деформация), и наоборот – в случае прогиба корпуса. Коэффициент сходимости δ_1 представляет собой заданный допуск нулевого значения для УРС.

Модифицированный пошагово-итерационный метод. Пошагово-итерационный метод МАКО предполагает, что судно находится в прямом положении и изгибающий момент действует в вертикальной плоскости судна. Это называется вертикальным изгибом.

Как упомянуто во введении, если судно из-за неравномерного распределения груза или повреждения конструкции в случае столкновения и/или посадки на мель приобретает крен, то кроме вертикального изгиба M_y , на него также будет воздействовать горизонтальный изгиб, то есть изгибающий момент M_z , действующий в горизонтальной плоскости судна. Рассматривая общий случай асимметричного поперечного сечения корпуса из-за повреждения конструкции при столкновении (обозначено серой областью), поступление забортной воды приводит к крену судна, как показано на рис. 1.

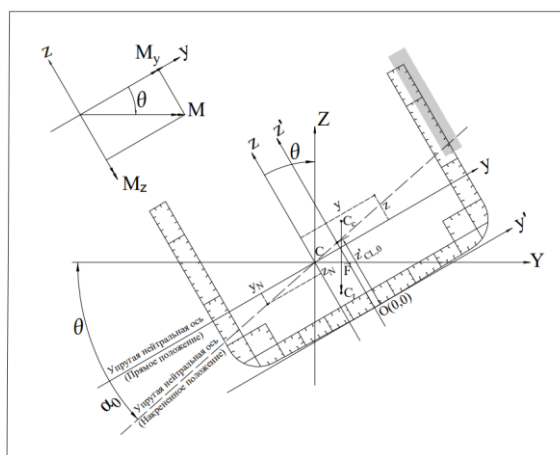


Рис. 1. Система координат для анализа прогрессирующего разрушения при одновременном горизонтальном и вертикальном изгибе

Системы координат и обозначения на рис. 1 определяются следующим образом: $Oy'z'$ – система координат, где ось z' находится в плоскости симметрии судна до момента повреждения; $C(y'_c, z'_c)$, $C_c(y'_c, z'_c)$ и $C_t(y'_c, z'_c)$ – соответственно центр тяжести (ЦТ) упругости, ЦТ зоны сжатия и ЦТ зоны растяжения поперечного сечения корпуса после повреждения конструкции; Cuz – система координат с осями, параллельными осям системы координат $Oy'z'$; CYZ – система координат, где ось Y параллельна ватерлинии; θ – угол крена судна относительно ватерлинии; α_0 – угол новой упругой НО относительно исходного положения; $z'_{CL,0}$ – вертикальное положение на оси Oz' новой упругой НО.

Изгибающие моменты M_y и M_z непосредственно связаны и являются составляющими общего изгибающего момента M (действующего в «истинной» вертикальной плоскости):

$$M_y = M \cdot \cos \theta, M_z = -M \cdot \sin \theta. \quad (2)$$

Рассматривая поперечное сечение корпуса в упругой области, напряжение σ_i в точке (y, z) может быть получено следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{(I_{yz} \cdot \cos \theta + I_y \cdot \sin \theta) \cdot y - (I_{yz} \cdot \sin \theta + I_z \cdot \cos \theta) \cdot z}{I_{yz}^2 - I_y \cdot I_z}. \quad (3)$$

где I_y и I_z – вертикальный и горизонтальный моменты инерции относительно осей y и z соответственно, а I_{yz} – центробежный момент инерции в системе координат Cyz .

При $\sigma_i = 0$ координаты y и z лежат на НО (y_N, z_N) (см рис. 1), и соответственно получаем:

$$\frac{(I_{yz} \cdot \cos \theta + I_y \cdot \sin \theta) \cdot y - (I_{yz} \cdot \sin \theta + I_z \cdot \cos \theta) \cdot z}{I_{yz}^2 - I_y \cdot I_z} = 0, \quad (4)$$

или

$$z_N = \frac{I_{yz} \cdot \cos \theta + I_y \cdot \sin \theta}{I_{yz} \cdot \sin \theta + I_z \cdot \cos \theta} \cdot y_N. \quad (5)$$

Уравнение (5) дает уравнение упругой НО поперечного сечения корпуса в условиях крена. Угол α_0 новой упругой НО относительно её исходного положения задаётся выражением:

$$\tan \alpha_0 = \frac{z_N}{y_N} = \frac{I_{yz} \cdot \cos \theta + I_y \cdot \sin \theta}{I_{yz} \cdot \sin \theta + I_z \cdot \cos \theta}. \quad (6)$$

Вертикальное положение на оси Oz' новой упругой НО $z'_{CL,0}$ определяется следующим образом:

$$z'_{CL,0} = z'_C - y'_C \cdot \tan \alpha_0. \quad (7)$$

Как упомянуто во введении, НО не только смещается поступательно, но и поворачивается на каждом шаге приращения кривизны χ . Тогда уравнение мгновенной НО в системе координат $Oy'z'$ определяется следующим образом:

$$z' = \tan \alpha(\chi) \cdot y' + z'_{CL}(\chi), \quad (8)$$

где $z'_{CL}(\chi)$ и $\alpha(\chi)$ – соответственно вертикальное положение на оси Oz' и угол поворота относительно оси Oy' НО на каждом шаге приращения кривизны χ .

Расстояние от любого i -го элемента поперечного сечения с координатами ЦТ $C_i(y'_i, z'_i)$ до линии НО определяется следующим образом:

$$d_i(\chi) = |\sin \alpha(\chi) \cdot y'_i + z'_{CL}(\chi) \cdot \cos \alpha(\chi) - z'_i \cdot \cos \alpha(\chi)|. \quad (9)$$

Для определения того, находится ли рассматриваемый i -й элемент выше или ниже линии НО, используется следующее условие:

$$\begin{aligned} z'_i - \tan \alpha(\chi) \cdot y'_i - z'_{CL}(\chi) > 0, & \text{ выше линии НО,} \\ z'_i - \tan \alpha(\chi) \cdot y'_i - z'_{CL}(\chi) < 0, & \text{ ниже линии НО.} \end{aligned} \quad (10)$$

Затем продольная деформация $\varepsilon_i(\chi)$ рассматриваемого i -го элемента определяется следующим образом:

$$\varepsilon_i(\chi) = \pm \chi \cdot d_i(\chi). \quad (11)$$

Знак продольной деформации в уравнении (11) принимается по следующему соглашению: в случае перегиба корпуса структурные элементы выше НО получают отрицательную деформацию, в то время как элементы ниже НО получают положительную деформацию, и наоборот – в случае прогиба корпуса.

Угол поворота $\alpha(\chi)$ мгновенной НО определяется на основе УВРС следующим образом [13]:

$$h = \left| \cos^{-1} \frac{\vec{F} \cdot \vec{M}}{|\vec{F}| \cdot |\vec{M}|} - \frac{\pi}{2} \right| = \delta_2, \quad (12)$$

где $\vec{F} = \vec{C}_c \vec{C}_i$ – вектор силы, соединяющий ЦТ зоны сжатия C_c с ЦТ зоны растяжения C_i (см. рис. 1), \vec{M} – вектор общего изгибающего момента корпуса. Коэффициент δ_2 представляет собой заданный допуск нулевого значения.

Координаты ЦТ C_c и C_i в системе координат $Oy'z'$ на каждом шаге приращения кривизны χ могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} y'_{C_c}(\chi) &= \sum F_{ic}(\chi) \cdot y'_i / \sum F_{ic}(\chi) \text{ с } \sigma_{x,i}(\chi) > 0, \\ z'_{C_c}(\chi) &= \sum F_{ic}(\chi) \cdot z'_i / \sum F_{ic}(\chi) \text{ с } \sigma_{x,i}(\chi) > 0, \\ y'_{C_i}(\chi) &= \sum F_{it}(\chi) \cdot y'_i / \sum F_{it}(\chi) \text{ с } \sigma_{x,i}(\chi) < 0, \\ z'_{C_i}(\chi) &= \sum F_{it}(\chi) \cdot z'_i / \sum F_{it}(\chi) \text{ с } \sigma_{x,i}(\chi) < 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Для точного определения вертикального положения $z'_{CL}(\chi)$ на оси Oz' и угла поворота $\alpha(\chi)$ относительно оси Oy' НО на каждом шаге приращения кривизны χ , требуется одновременное выполнение как УРС в уравнении (1), так и УВРС в уравнении (12). Таким образом, поиск решения становится задачей оптимизации, связанной со скалярными целевыми функциями в заданном пространстве решений. Существует несколько алгоритмов для решения задач оптимизации [15]. Алгоритм SLSQP благодаря простой реализации, быстрой сходимости и удовлетворительной точности получил широкое распространение в различных областях техники, таких как решение задач проектирования самолетов, а также оптимального управления для самолетов и космических кораблей [16]. В данном исследовании для получения решения выбран алгоритм SLSQP.

После суммарный изгибающий момент M на каждом шаге приращения кривизны χ вычисляется следующим образом:

$$M = \sum_{i=1}^m \sigma_i(\chi) \cdot A_i \cdot \chi. \quad (14)$$

Алгоритм SLSQP. Алгоритм SLSQP для решения задач нелинейной оптимизации. Общая форма задачи формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \min f(x), x \in R^n, \\ \text{при условиях: } h(x) = 0, \\ g(x) \leq 0, \\ l_i \leq x_i \leq u_i, \end{aligned} \quad (15)$$

где $x \in R^n$ – вектор оптимизируемых переменных; $f: R^n \rightarrow R$ – целевая функция; $h: R^n \rightarrow R^m$ – ограничения равенства; $g: R^n \rightarrow R^p$ – ограничения неравенства; l, u – нижние и верхние границы переменных; n – количество оптимизируемых переменных; m – количество ограничений равенства, p – количество ограничений неравенства. В связи с ограничениями на объём статьи, подробное описание алгоритма SLSQP не приводится. Подробнее см. в [14].

Для определения положения НО используется алгоритм SLSQP, где целевая функция f представляет норму, определенную в уравнении (1), а переменная x представляет вектор вертикального положения и угла поворота НО на каждом шаге приращения кривизны. Ограничение-равенство h представляет норму, определенную в уравнении (12). На рис. 2б представлена блок-схема предложенного модифицированного пошагово-итерационного метода. Предложенный модифицированный пошагово-итерационный метод реализован с помощью специальной программы, разработанной нами на языке Python, и состоит из трех частей:

1. Первая часть выполняет вычисления координат ЦТ, вертикального и горизонтального моментов инерции, центробежного момента инерции в системе координат $Oy'z'$, площади и эквивалентного предела текучести элементов.
2. Вторая часть выполняет вычисления общей площади, координат ЦТ, вертикального и горизонтального моментов инерции, центробежного момента инерции поперечного сечения корпуса судна в системе координат Syz , момента сопротивления сечения, вертикального положения и угла поворота упругой НО.
3. Третья часть выполняет анализ по пошагово-итерационному методу МАКО и модифицированному пошагово-итерационному методу, где положение НО на каждом шаге приращения кривизны для обоих методов определяется с помощью алгоритма SLSQP, реализованного через библиотеку Scipy [17].

Входные данные, включающие технические параметры и свойства материалов элементов и корпуса судна, а также результирующие выходные данные, хранятся в программной среде Excel.

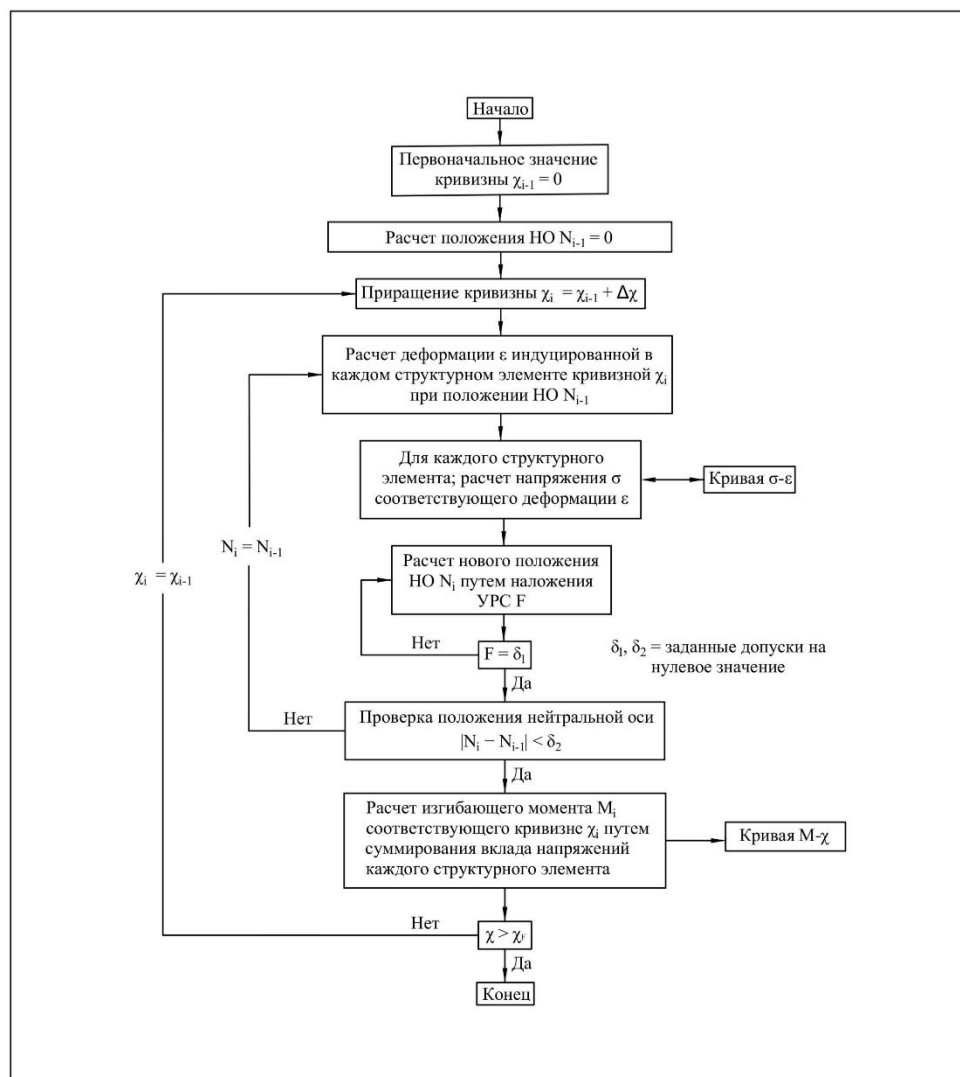


Рис. 2. а) Блок-схема процедуры построения кривой $M - \chi$ [11];

Применение метода

На основе модифицированного пошагово-итерационного метода и блок-схемы на рис. 2б, для исследования поступательного смещения и угла поворота НО несимметричного поперечного сечения, а также их влияния на предельную несущую способность, был выбран контейнеровоз, который являлся одним из судов, использованных в исследовании ISSC [1, 10]. Основные технические характеристики судна: длина между перпендикулярами – 230,0 м; теоретическая ширина – 32,2 м; теоретическая высота борта – 21,5 м; расчетная осадка – 12,5 м; коэффициент общей полноты – 0,68. Технические параметры и свойства материалов продольных ребер жёсткости представлены в табл. 1. Поперечное сечение мидель-шпангоута судна показано на рис. 3а. Моделирование поперечного сечения судна в соответствии с нормами МАКО [11] представлено на рис. 3б. Модуль Юнга составляет 206 ГПа, а коэффициент Пуассона равен 0,3.

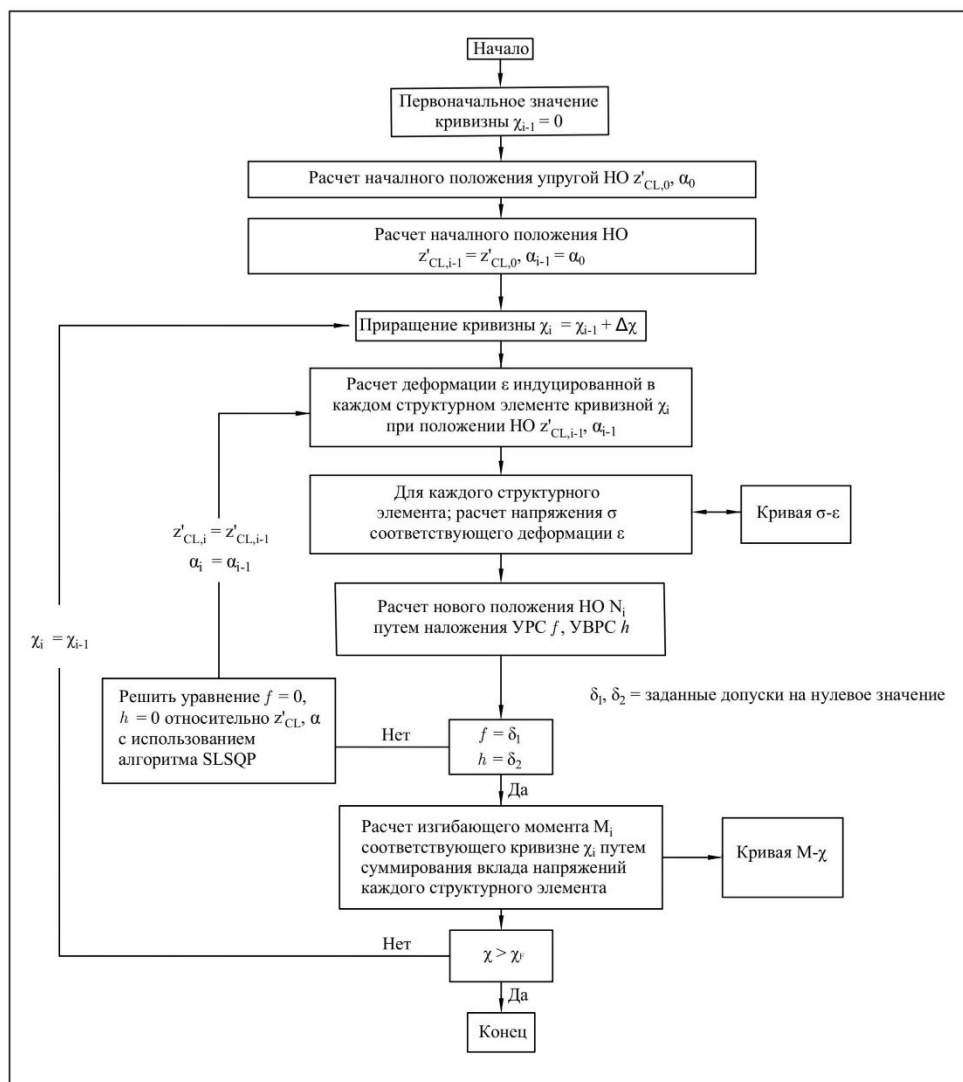


Рис. 2. б) блок-схема предложенного модифицированного пошагово-итерационного метода

Таблица 1

Технические параметры продольных рёбер жёсткости контейнерова

№	Размеры (мм)	Тип	R_{eH} (МПа)	№	Размеры (мм)	Тип	R_{eH} (МПа)
1	300x38	полос	352,8	9	230x10	полос	313,6
2	300x28	полос	313,6	10	300x13+90x17	уголок	313,6
3	250x10+90x15	уголок	313,6	11	150x12+90x12	уголок	313,6
4	250x12+90x16	уголок	313,6	12	250x12+90x15	уголок	313,6
5	300x11+90x16	уголок	313,6	13	150x12	полос	313,6
6	300x13+90x17	уголок	313,6	14	150x9+90x9	уголок	313,6
7	350x12+100x17	уголок	313,6	15	150x10	полос	313,6
8	400x11,5+100x16	уголок	313,6	16	300x11+90x16	уголок	313,6

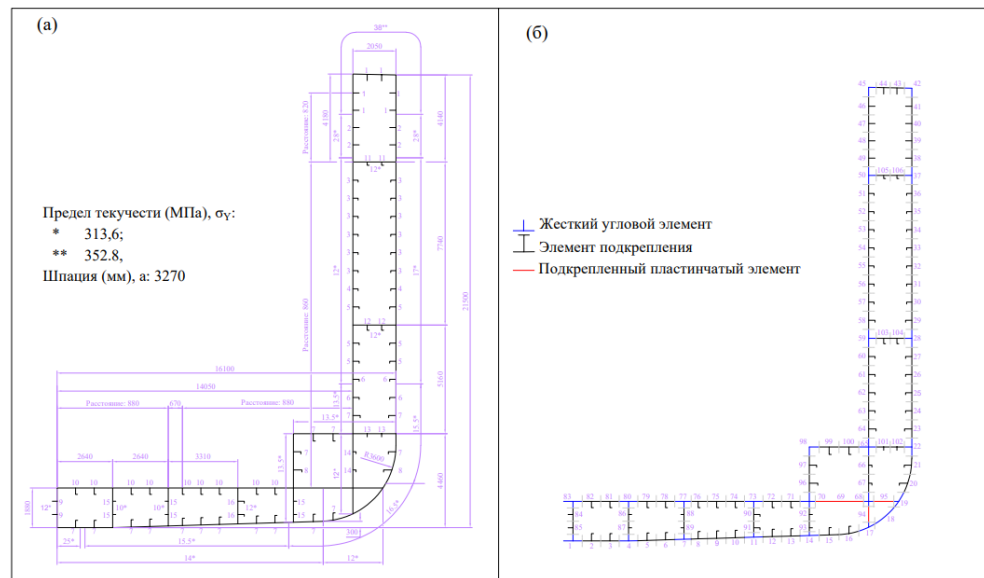


Рис. 3. а) Поперечное сечение мидель-шпангоута; б) моделирование полупоперечного сечения мидель-шпангоута

Анализ предельной прочности в неповрежденном состоянии. На рис. 4 представлена анализируемая схема поперечного сечения с соответствующими характеристиками поперечного сечения при прямом плавании, рис. 6 – при поперечном крене неповрежденного судна на 75° . На рис. 5а и 5б показаны, соответственно, детали полученной зависимости $M - \chi$ и вертикальное смещение НО $\Delta z = z'_{CL}(\chi) - z'_{CL,0}$ и угловое смещение $\Delta \alpha = \alpha(\chi) - \alpha_0$ относительно значений упругой НО для случаев перегиба и прогиба корпуса при прямом плавании, рис. 7а и 7б – при поперечном крене неповрежденного судна на 75° . В табл. 2 представлены результаты расчётов, выполненных в данном исследовании, а также справочные данные из отчётов ISSC [1, 10].

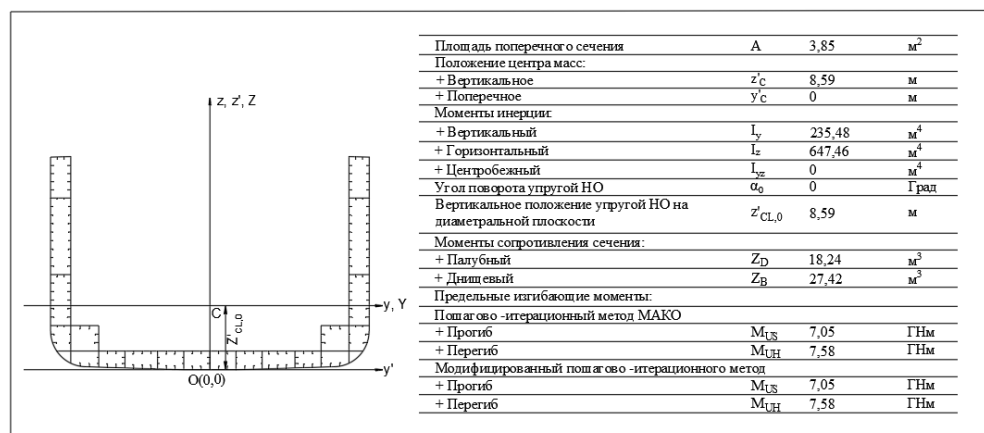


Рис. 4. Анализируемая схема сечения с соответствующими полными характеристиками поперечного сечения при прямом плавании

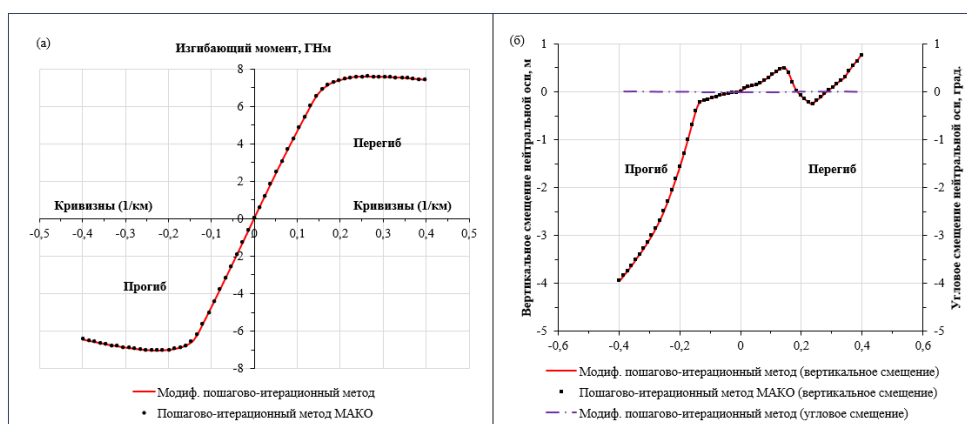


Рис. 5. Кривая зависимости $M - \chi$ (а) и смещение НО для случаев прогиба и перегиба при прямом плавании – неповрежденное состояние (б)

Таблица 2

Сводные данные по предельной продольной прочности контейнеровоза

Источник	Автор	Метод	Предельный момент, (ГНм)	
			Прогиб	Перегиб
Отчёт ISSC 2000	Chen	ISUM	5,47	6,56
	Cho	Пошагово-итерационный метод	5,13	6,69
	Masaoka	ISUM	7,75	8,07
	Rigo (1)	Пошагово-итерационный метод	6,51	7,60
	Rigo (2)	Метод Р-М (1995)	6,91	7,20
	Yao	Пошагово-итерационный метод	6,72	6,72
Отчёт ISSC 2012	Paik	МКЭ	6,95	6,97
		ISUM	6,64	6,92
		Модиф. метод П-М	7,08	6,40
	Wang	Пошагово-итерационный метод	6,85	7,76
		МКЭ	7,63	7,66
	Университет Генуи	Пошагово-итерационный метод	7,59	7,88
Настоящее исследование		Правила RINA	5,90	6,86
		Модиф. пошагово-итерационный метод	7,05	7,58
		Пошагово-итерационный метод	7,05	7,58

Можно видеть, что, когда неповрежденное судно находится в прямом положении, его геометрия и нагрузки симметричны. При увеличении кривизны НО совершает только поступательное движение без вращения. Следовательно, результаты, полученные по пошагово-итерационному методу МАКО и предложенному модифицированному пошагово-итерационному методу в данном исследовании, идентичны. Сравнение результатов исследования с данными, представленными в отчётах ISSC [1, 10], показывает, что точность результатов является удовлетворительной. Результаты, представленные Paik и Wang, также были получены с использованием пошагово-итерационного метода МАКО. Результаты данного исследования показали расхождение в 2,86% с результатами Paik и 7,14% с результатами Wang в условиях прогиба корпуса; а также расхождение в 2,25% с результатами Paik и 3,75% с результатами Wang в условиях перегиба корпуса. По нашему мнению, указанные расхождения могут быть обусловлены различиями в

методиках моделирования, включая использование жёстких угловых элементов, определение кривых «среднее напряжение – средняя деформация» для каждого элемента и коэффициента сходимости δ_1 в уравнении (1) в различных рабочих процедурах, применяемых разными исследователями. Более того, результаты, полученные различными численными методами, также различаются, поэтому важно осознавать, что в прогнозировании предельной прочности корпуса судна сохраняется значительная неопределённость. Для верификации численных методов и повышения достоверности прогнозов в будущем необходимы физические эксперименты на натурных образцах или, как минимум, крупномасштабных моделях корпусов судов.

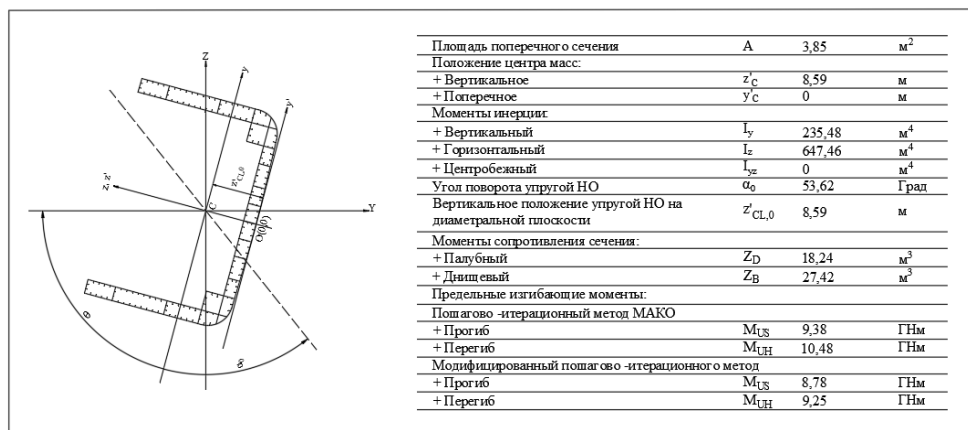


Рис. 6. Анализируемая схема сечения с соответствующими полными характеристиками поперечного сечения при поперечном крене 75° – неповрежденное состояние

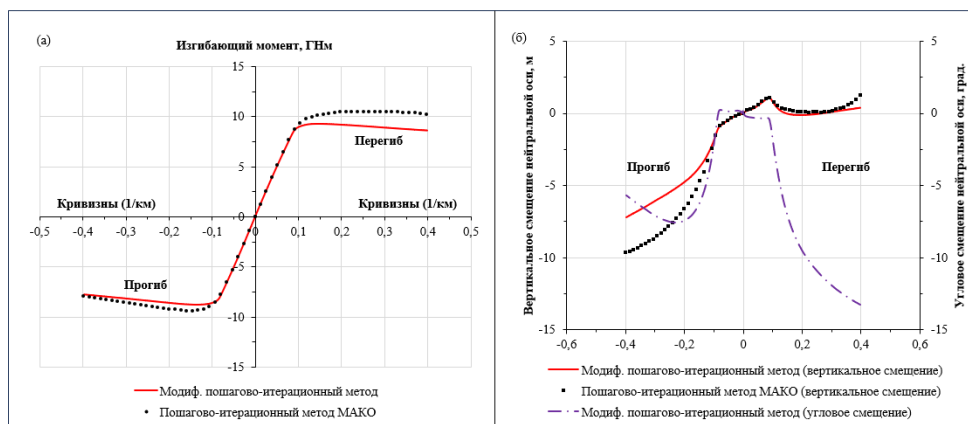


Рис. 7. Кривая зависимости $M - \chi$ (а) и смещение и поворот НО для случаев прогиба и перегиба при поперечном крене 75° – неповрежденное состояние (б)

В случае крена неповрежденного судна на 75° влияние поворота НО на зависимость $M - \chi$ становится значительным в нелинейной области, и значительная разница наблюдается в поведении конструкции после потери устойчивости. Предельные изгибающие моменты для случаев прогиба и перегиба корпуса, полученные по пошагово-итерационному методу МАКО, оказались выше значений, рассчитанных по модифицированному пошагово-итерационному методу, с расхождением на 7,05% и 13,23% соответственно. Это приводит к завышенной оценке

несущей способности корпуса. Влияние различных углов поворота НО на предельную прочность неповрежденного судна представлено в табл. 3.

Результаты в табл. 3 показывают, что для выбранного в исследовании судна поворот НО приводит к различному влиянию на предельный изгибающий момент. Следовательно, влияние угла поворота НО на предельный изгибающий момент асимметричного корпуса нельзя игнорировать, а УРС и УВРС позволяют эффективно отслеживать движение НО.

Таблица 3

Предельные изгибающие моменты, рассчитанные по модифицированному пошагово-итерационному методу и пошагово-итерационному методу МАКО

	Угол крена	Модифицированный пошагово-итерационный метод	Пошагово-итерационный метод МАКО	Разница, %
Изгибающий момент при прогибе, ГН·м	15°	7,13	7,09	-0,54
	30°	7,35	7,22	-1,76
	45°	7,53	7,42	-1,44
	60°	7,71	7,64	-0,85
	75°	8,77	9,38	7,05
Изгибающий момент при перегибе, ГН·м	15°	7,59	7,59	0,04
	30°	7,59	7,59	-0,04
	45°	7,64	7,59	-0,55
	60°	7,95	7,98	0,37
	75°	9,25	10,48	13,23

Анализ остаточной прочности в поврежденном состоянии. Для оценки сценариев повреждений точная информация о масштабах аварийных повреждений и влиянии структурных разрывов может быть получена с помощью нелинейного анализа МКЭ. Однако в данном исследовании, в соответствии с требованиями МАКО [11], продольная протяжённость повреждения рассматривается в пределах между двумя смежными поперечными шпангоутами: при столкновении учитываются только повреждения борта, которые затрагивают исключительно бортовую обшивку и её элементы подкрепления; при посадке на мель учитываются только повреждения днища, которые затрагивают исключительно днищевую обшивку и её элементы подкрепления. Следует отметить, что данное предположение может быть достаточно консервативным. Масштабы и расположение повреждений судна представлены на рис. 8.

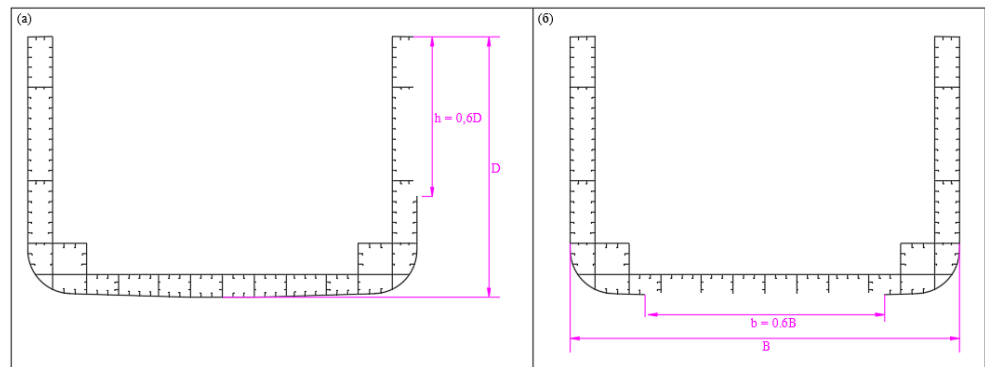


Рис. 8. Сценарии повреждений при столкновении (а) и при посадке на мель (б)

На рис. 9 и 11 представлена анализируемая схема поперечного сечения с соответствующими характеристиками поперечного сечения при прямом плавании – повреждение борта и днища, рис. 13 – при поперечном крене 75° – повреждение борта. На рис. 10а и 12а показаны полученной зависимости $M - \chi$, а на рис. 10б и 12б показаны, соответственно, изменение вертикального положения НО $\Delta z = z'_{CL}(\chi) - z'_{CL,0}$ и изменение угла поворота $\Delta\alpha = \alpha(\chi) - \alpha_0$ относительно значений упругой НО для случаев перегиба и прогиба корпуса при соответствующих сценариях повреждений в условиях прямого плавания; рис. 14а и 14б – при поперечном крене 75° – повреждение борта.

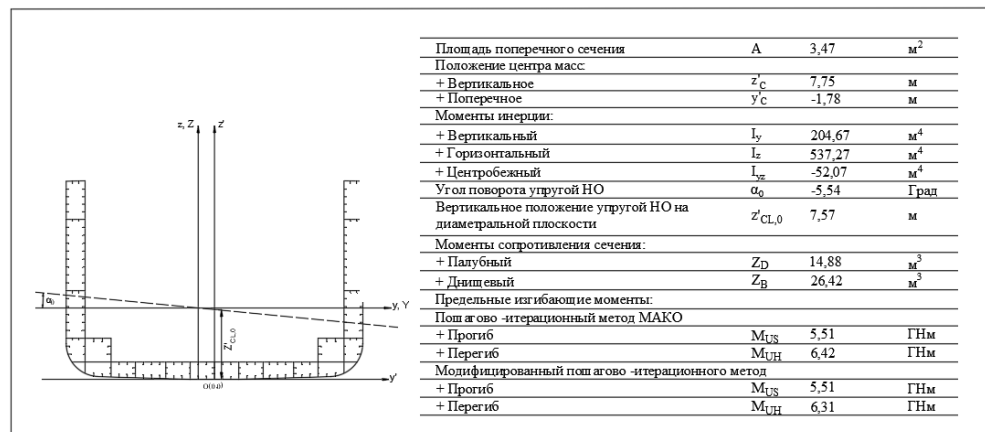


Рис. 9. Анализируемая схема сечения с соответствующими полными характеристиками поперечного сечения при прямом плавании – повреждение борта (столкновение)

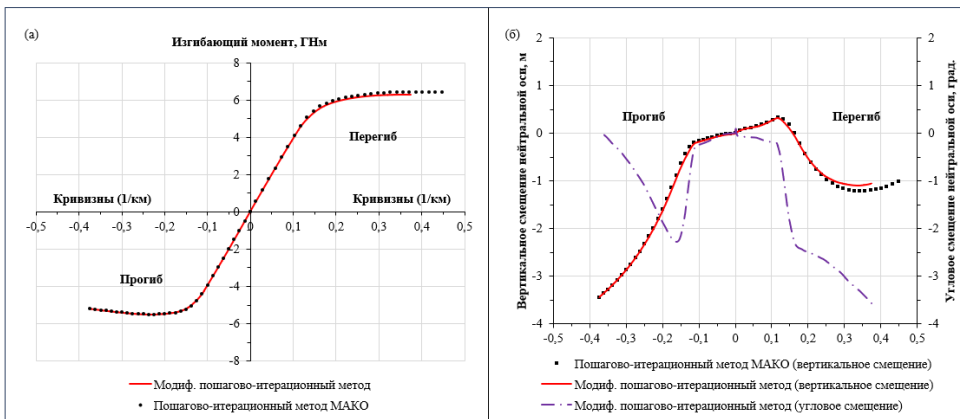


Рис. 10. Кривая зависимости $M - \chi$ (а) и смещение НО для случаев прогиба и перегиба при прямом плавании – повреждение борта (столкновение) (б)

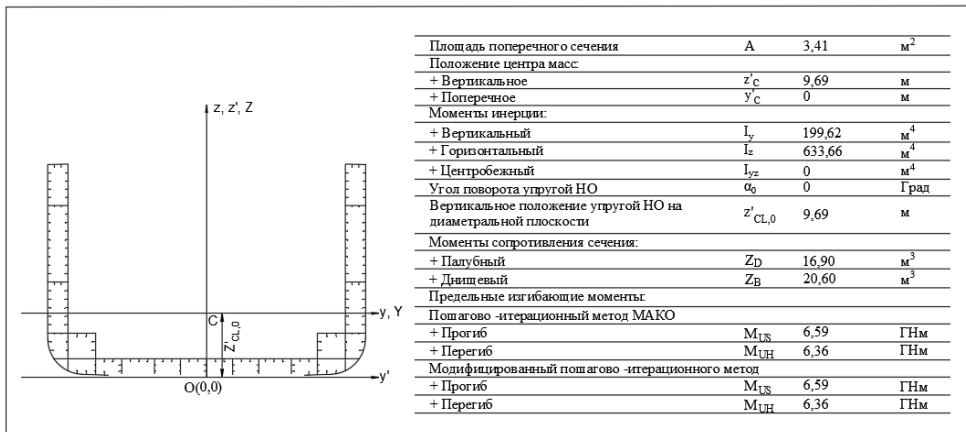


Рис. 11. Анализируемая схема сечения с соответствующими полными характеристиками поперечного сечения при прямом плавании – повреждение днища (посадка на мель)

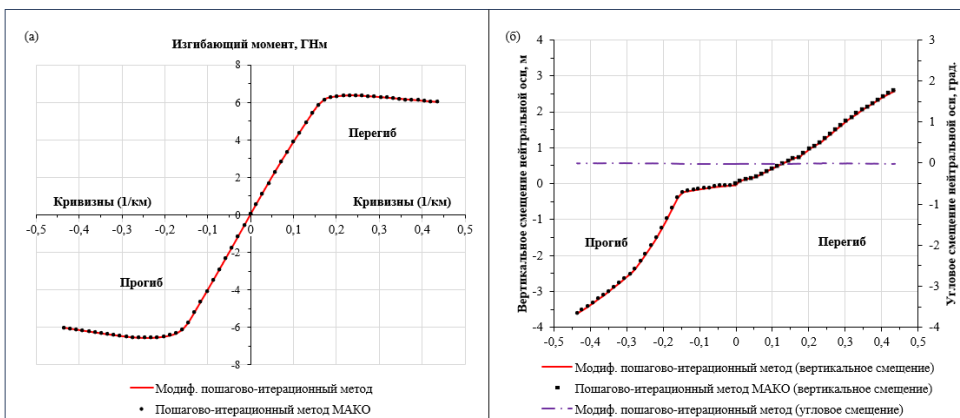


Рис. 12. Кривая зависимости $M - \chi$ (а) и смещение НО для случаев прогиба и перегиба при прямом плавании – повреждение днища (посадка на мель) (б)

Результаты показывают, что для различных сценариев повреждения (рис. 8) в условиях прямого плавания влияние поворота НО на предельного изгибающего момента является незначительным для данной конкретной конструкции корпуса. Кроме того, для случая повреждения днища (посадка на мель) в условиях прямого плавания на рис. 12а и 12б пошагово-итерационный метод МАКО и модифицированный пошагово-итерационный метод дают идентичные результаты, что подтверждает обоснованность их применения для расчета остаточной предельной прочности поврежденного симметричного корпуса судна.

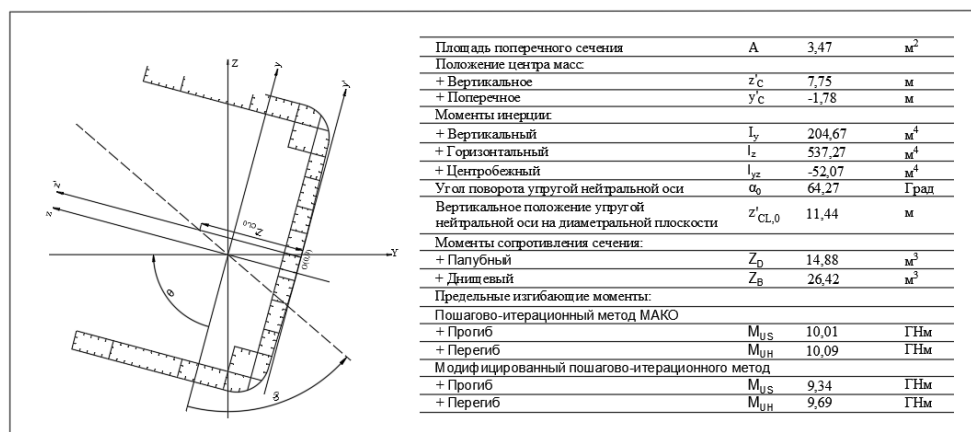


Рис. 13. Анализируемая схема сечения с соответствующими полными характеристиками поперечного сечения при поперечном крене 75° – повреждение борта (столкновение)

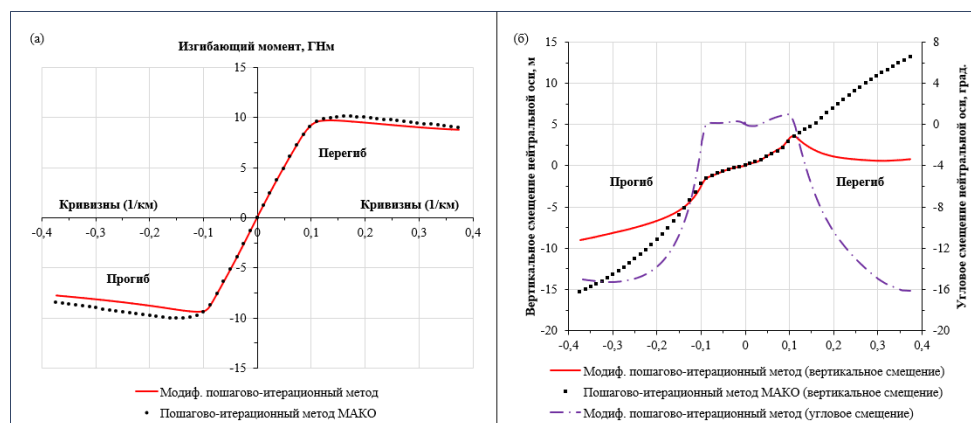


Рис. 14. Кривая зависимости $M - \chi$ (а) и смещение НО для случаев прогиба и перегиба при поперечном крене 75° – повреждение борта (столкновение) (б)

При крене судна на 75° в поврежденном в результате столкновения борту влияние поворота НО на зависимость $M - \chi$ становится значительным в нелинейной области, и значительная разница наблюдается в поведении конструкции после потери устойчивости. Предельные изгибающие моменты для случаев прогиба и перегиба корпуса, полученные по пошагово-итерационному методу МАКО, оказались выше значений, рассчитанных по модифицированному пошагово-итерационному методу, с расхождением на 7,18% и 4,12% соответственно.

Влияние различных углов поворота НО на предельную прочность поврежденного судна (повреждение борта из-за столкновения) представлено в табл. 4. Результаты, представленные в табл. 4, показывают, что влияние угла поворота НО варьируется в

зависимости от угла крена судна. В целом, с увеличением крена степень влияния поворота НО также возрастает. При определенных углах крена пренебрежение данным эффектом может приводить как к завышенному прогнозу предельного изгибающего момента (как в случаях 15° , 60° , 75°), так и к заниженному (как в случаях 30° , 45°), причем это справедливо как для случаев перегиба, так и для случаев прогиба.

Таблица 4

Предельные изгибающие моменты, рассчитанные по модифицированному пошагово-итерационному методу и пошагово-итерационному методу МАКО

	Угол крена	Модифицированный пошагово-итерационный метод	Пошагово-итерационный метод МАКО	Разница, %
Изгибающий момент при прогибе, ГН·м	15°	5,60	5,62	0,40
	30°	5,98	5,94	-0,64
	45°	6,75	6,61	-2,01
	60°	7,45	7,55	1,38
	75°	9,34	10,01	7,18
Изгибающий момент при перегибе, ГН·м	15°	6,59	6,63	0,65
	30°	6,99	6,89	-1,41
	45°	7,36	7,22	-1,92
	60°	7,78	7,82	0,42
	75°	9,69	10,09	4,12

Заключение

Был предложен модифицированный пошагово-итерационный метод, который учитывает влияние как вращательного, так и поступательного движения НО и предназначен для расчета предельной/остаточной прочности корпусной балки судна в неповрежденном и поврежденном состояниях. Применяв предложенный метод для анализа контейнеровоза, на основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Алгоритм SLSQP оказался пригодным для решения задачи одновременной оптимизации двух условий УРС и УВР с целью определения положения НО на каждом шаге приращения кривизны, обеспечивая быстрое схождение решения с требуемой точностью.
2. Для неповрежденного корпуса и корпуса, поврежденного в результате столкновения или посадки на мель в условиях прямого плавания, угол поворота НО оказывает незначительное влияние на прогноз предельной/остаточной прочности исследуемой судовой конструкции, когда повреждение борта ограничивается бортовой обшивкой и подкрепляющими шпангоутами, а повреждение днища — днищевой обшивкой и подкрепляющими шпангоутами.
3. Влияние угла поворота НО на предельную прочность неповрежденного корпуса при поперечном крене более существенно в условиях перегиба, чем в условиях прогиба. Расхождение в оценках предельного изгибающего момента может достигать 13,23% в условиях перегиба при угле поперечного крене 75° .

4. Угол поворота НО по-разному влияет при различных углах крена для поврежденного в результате столкновения корпуса, подверженного поперечному крену. В целом, степень его влияния возрастает с увеличением угла крена судна. Пренебрежение влиянием угла поворота НО может привести к завышению прогноза предельного изгибающего момента до 7,18% в условиях прогиба и до 4,12% в условиях перегиба.

Список литературы

1. Yao T., Astrup C., Carudis P., Chen N., Cho S.-R., Dow R., et al. Ultimate hull girder strength // Proc 14th international ship and offshore structures congress (ISSC). Nagasaki, Japan, 2000. –Vol. 2. – P. 321–391. URL: http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/Artigos%20Oficiais/3.3.11%20-%20ISSC2000_III.1_Ultimate%20Strenght.pdf. (На англ. яз.).
2. Caldwell J.B. Ultimate longitudinal strength // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. – 1965. – Vol. 107. – P. 411–430. (На англ. яз.).
3. Paik J.K., Mansour A. A Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships // Journal of Marine Science and Technology. – 1995. – Vol. 1. – Is. 1. – P. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01240013>. (На англ. яз.).
4. Paik J.K., Kim D.K., Park D.H., Kim H.B., Mansour A.E., Caldwell J.B. Modified Paik–Mansour formula for ultimate strength calculations of ship hulls // Ships and Offshore Structures. – 2013. – Vol. 8. – Is. 3-4. – P. 245–260. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2012.676247>. (На англ. яз.).
5. Li C., et al. Application of the incorporated meshing technique to non-linear FE analysis of hull girder ultimate strength // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016. – Is. OMAE2016-55094, V003T02A098. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-55094>. (На англ. яз.).
6. Ueda Y., Rashed S.M.H. The Idealized Structural Unit Method and Its Application to Deep Girder Structures // Computers & Structures. – 1984. – Vol. 18. – Is. 2. – P. 227–293. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90126-3](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90126-3). (На англ. яз.).
7. Paik J.K., Seo J.K., Kim D.M. Idealized structural unit method and its application to progressive hull girder collapse analysis of ships // Ships and Offshore Structures. – 2006. – Vol. 1. – Is. 3. – P. 235–247. <https://doi.org/10.1533/saos.2006.0129>. (На англ. яз.).
8. Smith C.S. Influence of Local Compression Failure on Ultimate Longitudinal Strength of Ship Hull // International Symposium on Practical Design in Shipbuilding (PRADS). Tokyo, Japan, Oct. 18–20, 1977. – P. 73–79. (На англ. яз.).
9. Коршунов В.А., Манухин В.А., Родионов А.А. Применение и сравнение различных методов вычисления предельных изгибающих моментов корпуса судна // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Ч. 2. – № 4. – С. 27–35. URL: https://morintex.ru/wp-content/files_mf/1671219577МИТ4ЧАСТЬ2022021612испр.pdf.
10. Paik, J. M., Amlashi, H., Boon, B., Branner, K., Caridis, P., Das, P., Fujikubo, M., Huang, C. H., Josefson, L., Kaeding, P., Kin, C. W., Parmentier, G., Pasqualino, I. P., Rizzo, C. M., Vhanmane, S., Wang, X. Z., and Yang, P. Committee III.1: Ultimate Strength // 18th International Ship and Offshore Structures Congress. Rostock, Germany, Sept. 9–13, 2012. – 50 p. URL: <https://issc2025.com/uploads/issc2012-vol1-com-III.1.pdf>. (На англ. яз.).
11. International Association of Classification Societies (IACS). Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers [ed. of 01 Jan. 2024 with corrigenda of 01 July 2025]. – London, UK: IACS, 2024. (На англ. яз.).
12. Fujikubo M., Alie M.Z.M., Takemura K., Iijima K., Oka S. Residual hull girder strength of asymmetrically damaged ships-influence of rotation of neutral axis due to damages // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. – 2012. – Vol. 16. – P. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.16.131>. (На англ. яз.).
13. Choung J., Nam J.-M., Ha T.-B. Assessment of residual ultimate strength of an asymmetrically damaged tanker considering rotational and translational shifts of neutral axis plane // Marine Structures. – 2012. – Vol. 25. – Is. 1. – P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.12.004>. (На англ. яз.).
14. Kraft D. A Software Package for Sequential Quadratic Programming // Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), research report

- DFVLR-FB 88-28, Jul 1988. – 33 p. URL:
https://degenerateconic.com/uploads/2018/03/DFVLR_FB_88_28.pdf. (На англ. яз.).
15. Joshy A. J. A modular development environment and library for optimization algorithms // arXiv preprint arXiv:2410.12942. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.12942>. (На англ. яз.).
 16. Srinath R., et al. Aerofoil optimization using SLSQP and validation using numerical and analytical methods // Vietnam Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 62. – Is. 6. – P. 1210–1226. DOI: <https://doi.org/10.15625/2525-2518/19371>. (На англ. яз.).
 17. Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature methods. – 2020. – Vol. 17. – Is. 3. – P. 261–272. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>. (На англ. яз.).

References

1. Yao T., Astrup C., Carudis P., Chen N., Cho S.-R., Dow R., et al. Ultimate hull girder strength // Proc 14th international ship and offshore structures congress (ISSC). Nagasaki, Japan, 2000. Vol. 2. P. 321–391. URL:
http://www.mar.ist.utl.pt/jgordo/Artigos%20Oficiais/3.3.11%20-%20ISSC2000_III.1_Ultimate%20Strenght.pdf.
2. Caldwell J.B. Ultimate longitudinal strength // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. 1965. Vol. 107. P. 411–430.
3. Paik J.K., Mansour A. A Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships // Journal of Marine Science and Technology. 1995. Vol. 1. Is. 1. P. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01240013>.
4. Paik J.K., Kim D.K., Park D.H., Kim H.B., Mansour A.E., Caldwell J.B. Modified Paik–Mansour formula for ultimate strength calculations of ship hulls // Ships and Offshore Structures. 2013. Vol. 8. Is. 3-4. P. 245–260. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2012.676247>.
5. Li C., et al. Application of the incorporated meshing technique to non-linear FE analysis of hull girder ultimate strength // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2016. Is. OMAE2016-55094, V003T02A098. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-55094>.
6. Ueda Y., Rashed S.M.H. The Idealized Structural Unit Method and Its Application to Deep Girder Structures // Computers & Structures. 1984. Vol. 18. Is. 2. P. 227–293. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(84\)90126-3](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90126-3).
7. Paik J.K., Seo J.K., Kim D.M. Idealized structural unit method and its application to progressive hull girder collapse analysis of ships // Ships and Offshore Structures. 2006. Vol. 1. Is. 3. P. 235–247. <https://doi.org/10.1533/saos.2006.0129>.
8. Smith C.S. Influence of Local Compression Failure on Ultimate Longitudinal Strength of Ship Hull // International Symposium on Practical Design in Shipbuilding (PRADS). Tokyo, Japan, Oct. 18–20, 1977. P. 73–79.
9. Korshunov V.A., Manukhin V.A., Rodionov A.A. Primenenie i sravnenie razlichnykh metodov vychisleniya predel'nykh izgibayushchikh momentov korpusa sudna [Application and comparison of various methods of calculation of ultimate bending moments of ship hull]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. № 4, part 2, SPb, izd. «NIC MORINTEKH», 2022, c. 27–35. (In Russ.). URL: https://morintex.ru/wp-content/files_mf/1671219577МИТ4ЧАСТЬ220221612испр.pdf.
10. Paik, J. M., Amlashi, H., Boon, B., Branner, K., Caridis, P., Das, P., Fujikubo, M., Huang, C. H., Josefson, L., Kaeding, P., Kin, C. W., Parmentier, G., Pasqualino, I. P., Rizzo, C. M., Vhanmane, S., Wang, X. Z., and Yang, P. Committee III.1: Ultimate Strength // 18th International Ship and Offshore Structures Congress. Rostock, Germany, Sept. 9–13, 2012. 50 p. URL: <https://issc2025.com/uploads/issc2012-vol1-com-III.1.pdf>.
11. International Association of Classification Societies (IACS). Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers [ed. of 01 Jan. 2024 with corrigenda of 01 July 2025]. London, UK: IACS, 2024.
12. Fujikubo M., Alie M.Z.M., Takemura K., Iijima K., Oka S. Residual hull girder strength of asymmetrically damaged ships-influence of rotation of neutral axis due to damages //

- Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 2012. Vol. 16. P. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.16.131>.
13. Choung J., Nam J.-M., Ha T.-B. Assessment of residual ultimate strength of an asymmetrically damaged tanker considering rotational and translational shifts of neutral axis plane // Marine Structures. 2012. Vol. 25. Is. 1. P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2011.12.004>.
 14. Kraft D. A Software Package for Sequential Quadratic Programming // Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), research report DFVLR-FB 88-28, Jul 1988. 33 p. URL: https://degenerateconic.com/uploads/2018/03/DFVLR_FB_88_28.pdf.
 15. Joshy A. J. A modular development environment and library for optimization algorithms // arXiv preprint arXiv:2410.12942. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.12942>. (На англ. яз.).
 16. Srinath R., et al. Aerofoil optimization using SLSQP and validation using numerical and analytical methods // Vietnam Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 62. Is. 6. P. 1210–1226. DOI: <https://doi.org/10.15625/2525-2518/19371>.
 17. Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature methods. 2020. Vol. 17. Is. 3. P. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Огай Сергей Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессора кафедры теории и устройства судна, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а, Российская Федерация, e-mail: Ogay@msun.ru

Ле Чонг Тхинь – аспирант кафедры теории и устройства судна, Морской государственной университет имени адмирала Г.И. Невельского, 690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а, Российская Федерация, e-mail: letrongthinhdvtva@gmail.com

Sergei A. Ogay, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Ship Theory and Design, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, 50a Verkhneportovaya Street, Vladivostok City, Russian Federation, 690059, email: Ogay@msun.ru

Le Trong Thinh, Postgraduate Student of the Department of Ship Theory and Design, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, 50a Verkhneportovaya Street, Vladivostok City, Russian Federation, 690059, email: letrongthinhdvtva@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.02.2026; принята к публикации 20.04.2026; опубликована онлайн 20.06.2026. Received 19.02.2026; published online 20.06.2026.