

Научная статья

УДК 629.5.011

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/26-37>

## Прочность и эффективность наружных ледовых усилений в районах с продольной системой набора

Сергей Всеволодович Каленчук<sup>1</sup>, Александр Витальевич Котлярский<sup>2,✉</sup>, Виктор Анатольевич Кулеш<sup>2</sup>, Хиен Чунг Фам<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный центр судостроения и судоремонта,

Владивосток, Российская Федерация

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет,

Владивосток, Российская Федерация,

<sup>3</sup> Исследовательский институт кораблестроения,

Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru

**Аннотация.** Практика судостроения достаточно широко использует наружные усиления корпусов судов, например в виде привальных брусков для швартовок или в виде брусковых килей для контактов с грунтом, а также в других случаях. В последние годы всё большее распространение в мире и в отечественной практике получают наружные ледовые усиления корпусов в районе ватерлиний. Они достаточно эффективны в качестве защиты от износа и повышают прочность наружной обшивки на действие льда. Особую актуальность такие усиления имеют для судов иностранной постройки, работающих в российских условиях. Наибольшие повреждения характерны в районах носовых бульбов и в районах с продольной системой набора. Практика реализации наружных ледовых усилений включает широкий спектр конструктивных решений, которые не обеспечены регламентацией в нормативных документах классификационных обществ и недостаточно отражены в научно-технической литературе. В работе рассмотрен широкий круг вопросов по анализу прочности и эффективности наружных ледовых усилений для районов корпуса с продольной системой набора. Выполнены сравнения вариантов решений и показаны направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** корпус судна, наружные ледовые усиления, прочность, эффективность

**Для цитирования:** Каленчук С.В., Котлярский А.В., Кулеш В.А., Фам Ч.Х. Прочность и эффективность наружных ледовых усилений в районах с продольной системой набора // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 26–37.

Original article

## Strength and effectiveness of external ice reinforcements in areas with a longitudinal scantling system

Sergei V. Kalenchuk<sup>1</sup>, Alexander V. Kotlyarsky<sup>2,✉</sup>, Victor A. Kulesh<sup>2</sup>, Hiep Trung Pham<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern Shipbuilding and Repair Center, Vladivostok, Russian Federation

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,

<sup>3</sup> Research Institute of Shipbuilding, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru

**Abstract.** The practice of shipbuilding makes extensive use of external reinforcements of ship hulls, for example in the form of rubbing strake for mooring or in the form of bar keels for contact with the ground, as well as in other cases. In recent years, external ice reinforcement of hulls in the waterline area has become increas-

ingly widespread in the world and in domestic practice. They are quite effective as a wear protection and increase the strength of the shell plating against the forces of ice. Such reinforcements are of relevance for foreign-built vessels operating in Russian conditions. The greatest damage is typical in the areas of the bulb stem and in areas with a longitudinal scantling system. The practice of implementing external ice reinforcements includes a wide range of constructive solutions that are not regulated in the regulatory documents of classification societies and are not sufficiently reflected in the scientific and technical literature. The paper considers a wide range of issues related to the analysis of the strength and effectiveness of external ice reinforcements for hull areas with a longitudinal scantling system. Comparisons of solution options are made and directions for further research are shown.

**Keywords:** ship's hull, external ice reinforcements, strength, efficiency

**For citation:** Kalenchuk S.V., Kotlyarsky A.V., Kulesh V.A., Pham Tr.H. Strength and effectiveness of external ice reinforcements in areas with a longitudinal scantling system. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 26–37. (In Russ.).

### Опыт проектирования, эксплуатации и наружных усилений

Российский флот является самым приспособленным в мире к работе в ледовых условиях. Безопасность и прочность отечественных судов определяется заложенными методическими основами [1, 2], которые использовали описания параметров и форм эюр расчётных ледовых нагрузок при взаимодействии с острыми и скруглёнными кромками льда, а также допускали текучесть обшивки на опорах. Дальнейшее развитие этих основ [3, 4] привело к тезису о более широком использовании резервов предельной пластической прочности, включая набор, но при понижении внимания к формам эюр ледовых нагрузок. Не оспаривая целесообразность использования таких резервов, нужно отметить и недостатки методик предельного анализа в отношении конструкций, включающих связи с существенно разной жёсткостью (пластины обшивки и балки набора).

В настоящее время дополнительные возможности для анализа и проектирования конструкций дают программы, реализующие метод конечных элементов (МКЭ). Российский морской регистр судоходства (РМРС) формально учитывает такие возможности документом [5], который отдаёт приоритет упругому анализу балочных моделей с контролем допускаемых напряжений, определяемых через коэффициенты Правил [6] (часть II, Корпус). Аналогичные документы иностранных классификационных обществ (ИКО) отличаются более широким отражением возможностей использования МКЭ и моделирования конструкций. Например, документ DNV-GL (Норвежский Веритас и Германский Ллойд) [7] имеет на порядок больший объём, чем [5]. Однако прямой анализ прочности МКЭ в принципе невозможен при отсутствии параметров и формы эюр расчётных нагрузок. Дискуссии по этому вопросу продолжаются [1–4, 8–9], но без отражения результатов в документах РМРС для решения прикладных задач. Исключением является фрагмент Правил РМРС [10] (часть XVII, Дополнительные символы) в отношении судов с классами PC (Polar Class) по международной классификации. Однако и здесь роль МКЭ ограничена только анализом рамного набора, без представления формы эюр ледовых нагрузок в явном виде.

Повреждения судов при плавании во льдах сохраняют актуальность. В большей мере они относятся к судам иностранной постройки, покупаемым для российских условий. Наиболее тяжёлые случаи характерны для носовых бульбов и районов с продольной системой набора (рис. 1а). Для снижения повреждений в мировой (Япония и ряд стран Тихоокеанского бассейна) и в отечественной практике всё большее распространение получают наружные ледовые усиления (НЛУ). Такие усиления представляют собой внешние приварные полосы, чаще полукруглого сечения и в ряде случаев под углом к горизонту (рис. 1б).

Простота и эффективность НЛУ часто кажется очевидной с позиции защиты от повышенного износа обшивки. Но роль НЛУ в повышении прочности обшивки ледового пояса также существенна. Специфика продольной системы набора в том, что пластины наружной обшивки сильно вытянуты и не имеют поперечных опор на протяжении до 6–7 шпаций (рис. 1с и 1д). Из-за стеснённости пространства в форпиках и у форштевней проектанты часто

оставляют набор только одного направления (например, платформы). Зона ледовых давлений локальна по высоте и также вытянута по горизонтали, что наиболее неблагоприятно для таких пластин. Повысить прочность этих пластин горизонтальными полосами НЛУ практически невозможно. Остаётся вариант ориентации полос НЛУ под углом к горизонту для обеспечения опор на продольном наборе. Примеры таких усилений даны на рис. 1с и 1d.

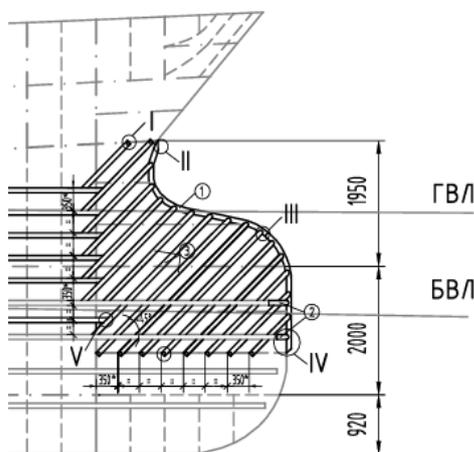
Сотрудники Департамента морской техники и транспорта ДВФУ уделяют вопросам НЛУ много внимания. Так, в работе [11] показано отличие оценок НЛУ с позиции предельной прочности и в упругом состоянии, а также возможность отрицательного эффекта в последнем случае. В работе [12] дан пример реализации НЛУ судна для работы на Северном морском пути (СМП). Обобщение опыта 10 лет эксплуатации судна с НЛУ дано в работе [13]. Анализ эффективности полос НЛУ под углом к горизонту рассматривался в работе [14], но только с позиции предельной прочности и использования неудачного (размерного) критерия. Ниже изложены результаты продолжения этих работ с позиции местной конструктивной ледовой прочности.



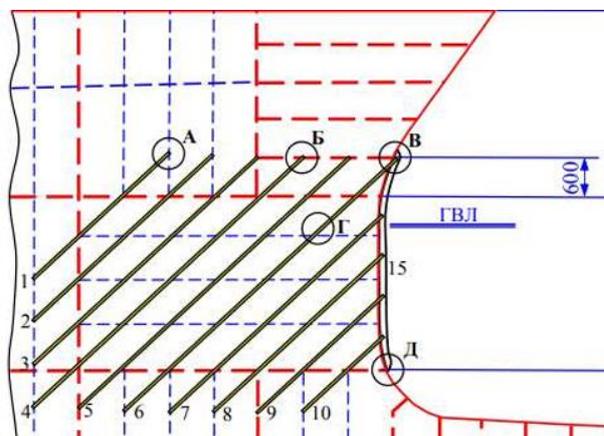
а) танкер водоизмещением 4404 тонны  
a) tanker with a displacement of 4404 tons



б) японская промысловая шхуна  
b) Japanese fishing schooner



с) танкер 1730 тонн  
c) tanker of 1730 tons



д) рефрижератор 16744 тонн  
d) refrigerator of 16744 tons

**Рис. 1. Примеры ледовых повреждений (а) и схем НЛУ (б, с, d) судов**

**Fig. 1. Examples of ice damage (a) and schemes of EIR (b, c, d) ships**

### Анализ упругой прочности на балочных моделях

Выше отмечено, что для прямых расчётов прочности корпусных конструкций МКЭ РМРС ориентирован на балочные модели. Поэтому в первую очередь рассмотрены такие возможности при НЛУ. Модели прямоугольных пластин были представлены в виде системы ортогональных полос. При этом использовались принципы сохранения толщины и уровня прочности – напряжений, соответствующих справочным значениям. Такие модели под равномерер-

ным поперечным давлением показали отличия наибольших напряжений от справочных значений – от 4 до 10% (в безопасную сторону) в широком диапазоне соотношения сторон от 1:7 до 1:1 соответственно. Это позволило применить такие балочные модели в решении более сложной задачи, в том числе при пиковой эпюре ледовых давлений в виде треугольной призмы и при наличии НЛУ. Расчёты выполнялись для схемы на рис. 1d. Регламентируемые параметры ледовой нагрузки  $952 \text{ кПа} \times 0,695 \text{ м} \times 4,9 \text{ м}$  соответствовали ледовому классу Ice2.

Учитывая, что регламентация ледовых связей РМРС базируется на критериях предельной пластической прочности, интерес представляет оценка уровней наибольших напряжений в упругой стадии работы при толщинах обшивки, соответствующих требованиям на момент постройки и на 5-летний класс с износом. Расчёты показали, что в районах наружной обшивки с рекомендуемой РМРС поперечной системой набора уровни напряжений могут существенно превышать напряжения текучести и доходить до:

329 МПа – при толщине обшивки, требуемой на момент постройки;

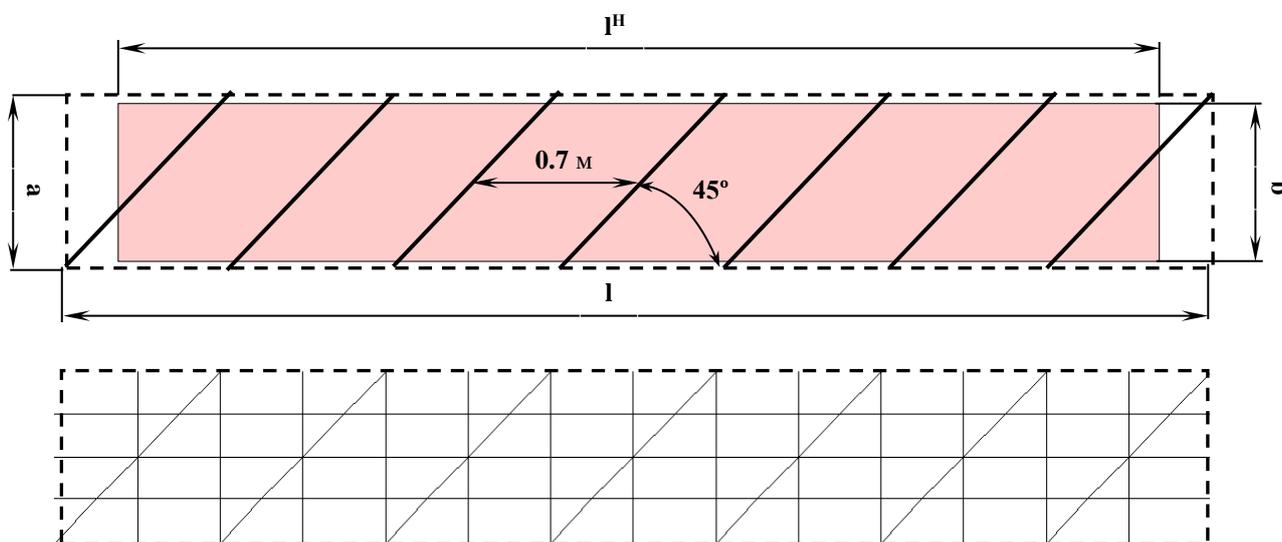
745 МПа – при допускаемых остаточных толщинах на класс РМРС.

Эти значения превышают предел текучести обычных сталей в 1,4 и 3,2 раза.

На следующем этапе решена задача с НЛУ наиболее слабых пластин наружной обшивки в районе с продольной системой набора в форпике у форштевня (рис. 2). Расчёты выполнены для двух случаев усиления обшивки наружными полосами полукруглого сечения с радиусами 30 и 37,5 мм. Толщина обшивки принята соответствующей 13 мм – по замерам остаточных толщин при дефектации. Параметры сечений полос определялись с присоединённым пояском шириной 164 мм (1/6 пролёта). Результаты показали:

1. При радиусе сечений полос 30 мм ледовая прочность повышается в 1,6 раза, при этом напряжения в сегментах превышают напряжения в обшивке всего на 2%.

2. При радиусе полос 37,5 мм ледовая прочность повышается в 1,7 раза, при этом напряжения в сегментах даже меньше, чем в обшивке, на 18%.



**Рис. 2. Балочная модель пластины с НЛУ под углом 45°**

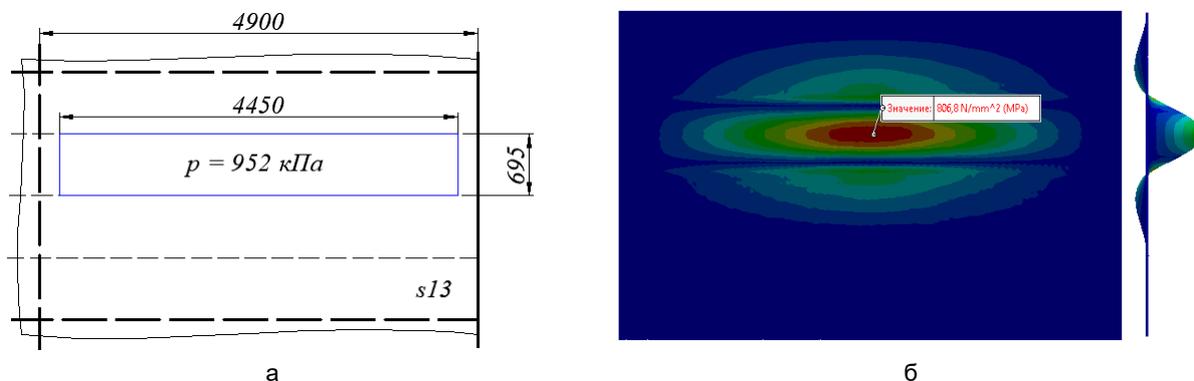
**Fig. 2. Beam model of a plate with an EIR at an angle of 45°**

Учитывая эти результаты и то, что износ наружных полос происходит более ускоренно, чем обшивки, для проекта усиления был выбран 2-ой вариант с радиусом 37,5 мм.

### **Анализ упругой прочности на пластинчатых моделях**

Отличия изгибной жёсткости обшивки и наружных полос вызывают вопрос о достоверности полученных в рамках балочных моделей оценок повышения прочности. Для его решения анализ продолжен на пластинчатых моделях. На рис. 3а показан участок борта с выделением границ зоны давлений, а также эпюра напряжений и прогибов без НЛУ (рис. 3б).

Рассмотрено 2 типа моделей. Модель 1 – изолированная прямоугольная пластина  $13 \times 695 \times 4900$  мм с жёсткой опорой и заделкой кромок. Модель 2 – комплекс из четырёх пластин (рис. 3а) с аналогичными условиями по контуру. Ледовая нагрузка приложена только на вторую (сверху) пластину. На рис. 3б показаны эпюры напряжений и прогибов при отсутствии НЛУ.



**Рис. 3. Схема участка борта с выделением зоны ледовых давлений (а) и эпюра напряжений (б) с сечением по линии прогибов (справа)**

**Fig. 3. Diagram of the side section with the allocation of the ice pressure zone (a) and the stress diagram (b) with a section along the deflection line (right)**

Для модели 1 (изолированной пластины) произведено варьирование ограничения на максимальный размер сетки конечных элементов с 50 до 25 мм. Сравнения показали, что такое изменение приводит к росту напряжений и числа элементов в 3–4 раза. При этом рост наибольших напряжений составляет:

- 12% – при отсутствии НЛУ пластины;
- 4% – при усилении полосами с радиусом 30 мм;
- 3% – при усилении полосами с радиусом 37,5 мм.

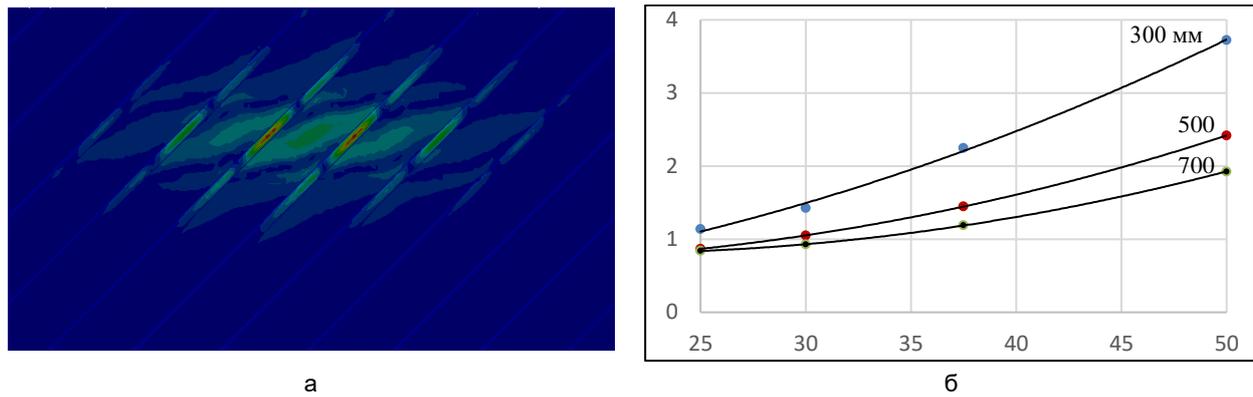
Рост наибольших прогибов модели не превысил 4,5%. Таким образом, рекомендации DNV-GL [7] по ограничению размеров сетки приемлемы для инженерных оценок в таких задачах. С учётом этого последующие расчёты использовали только ограничение в 50 мм.

Уровень наибольших напряжений в обшивке без НЛУ составил 768 МПа, что значительно меньше (в 1,7 раза) полученного ранее (1309 МПа) на основе балочных моделей. Таким образом, пластинчатые модели выявляют существенные резервы прочности обшивки в сравнении с балочными моделями, и это заслуживает учёта.

С позиции соотношения прочности полос НЛУ и обшивки получена существенная разница. Напряжения в полосах (радиусом 37,5 мм) составляют 652 МПа и в 1,72 раза больше напряжений в обшивке у пластинчатой модели, а у балочной модели они составляют 622 МПа, но это в 1,22 раза меньше напряжений в обшивке. Переоценка относительной прочности полос в балочных моделях полагается связанной с «классическим» присоединённым пояском обшивки. Это означает, что регламентация присоединённых поясков в таких задачах требует уточнения в сторону их уменьшения и с учётом того, что обшивка в виде балок-полосок уже включается в ортогональную систему, заменяющую пластину (рис. 2). В целом пластинчатые модели в таких задачах представляются более предпочтительными.

Для моделей 2 (комплекса из 4-х пластин) выполнен целый ряд расчётов с вариациями калибров (радиусов) полос, интервалов их размещения и углов положения.

Расчёты показали возможность повышения прочности за счёт НЛУ в 2 раза и более, но при определённом соотношении радиусов сечений и интервалов размещения полос. При уменьшении радиусов с одновременным увеличением интервалов расчёты показали отрицательный эффект понижения прочности – наибольшие напряжения пластины с НЛУ превышают уровень напряжений в пластине без усиления (рис. 4б, значения менее 1).

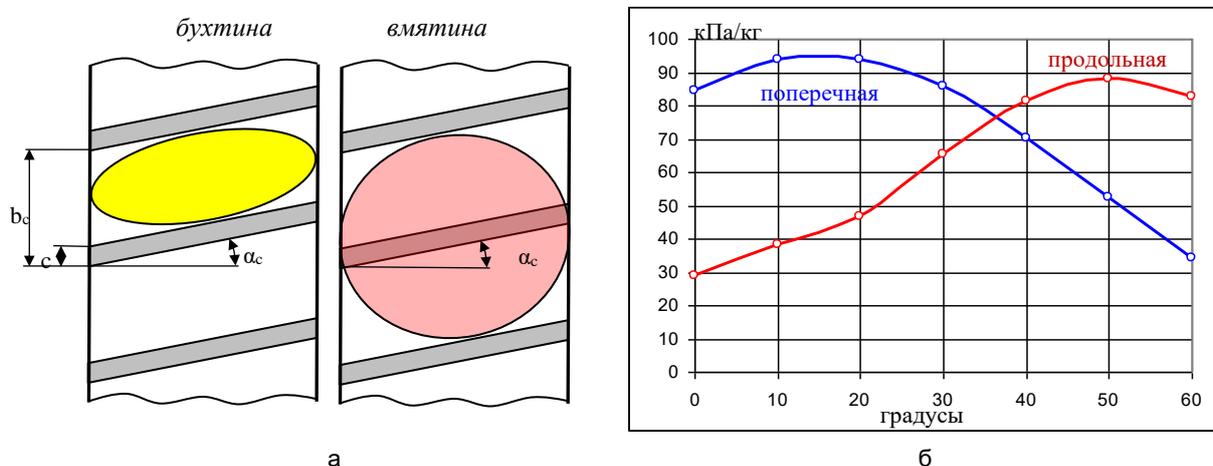


**Рис. 4. Эпюры приведённых напряжений при интервале между полосами 700 мм по горизонтали (а) и снижение наибольших напряжений (повышение прочности) в зависимости от радиусов полос при разных интервалах (б) и угле 45 градусов**

**Fig. 4. Diagrams of the reduced stresses at the interval between the strips of 700 mm horizontally (a) and reduction of the greatest stresses (increase in strength) depending on the radii of the strips at different intervals (b) and an angle of 45 degrees**

### Аналитические оценки предельной прочности

Выше отмечались результаты работы [14], в которой предложен алгоритм оценки предельной прочности пластин с НЛУ под разными углами. На рис. 5 показаны фрагменты из этой работы. В ней рассмотрены сценарии возможного повреждения обшивки между полосами (типа «бухтина») и повреждения обшивки вместе с полосой НЛУ (типа «вмятина») (рис. 5а). Кроме анализа предельной прочности в работе была выполнена оценка эффективности НЛУ в зависимости от углов наклона полос (рис. 5б). Показано, что наибольшая эффективность усилений зависит от системы набора (поперечная или продольная) и достигается при разных углах положения НЛУ к горизонту.

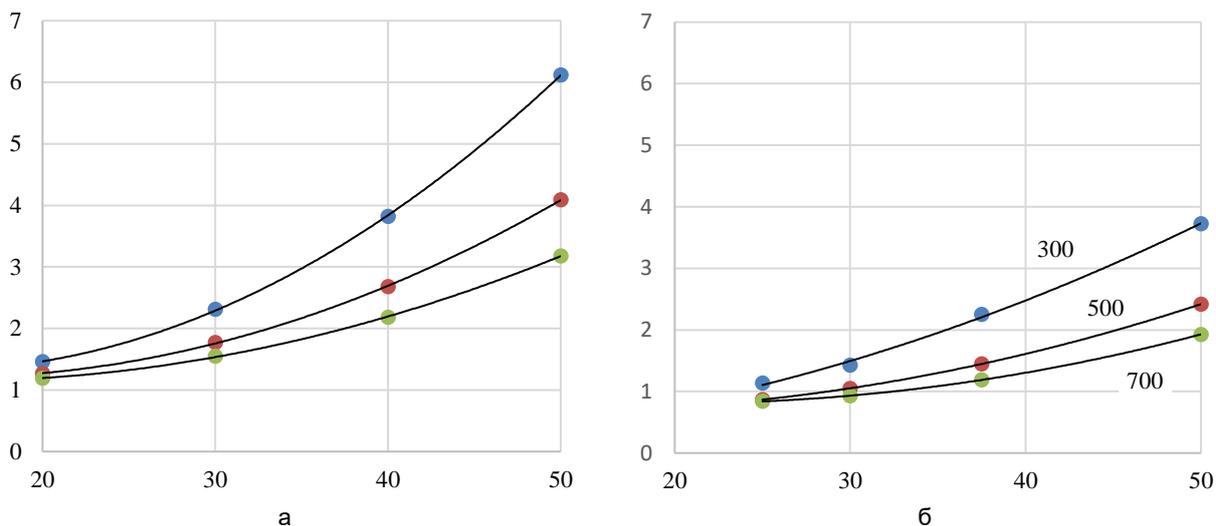


**Рис. 5. Расчётные схемы пластин с НЛУ (а) и оценки эффективности (б) из работы [14]**

**Fig. 5. Calculation schemes of plates with EIR (a) and efficiency estimates (b) from work [14]**

Для оценки эффективности НЛУ в работе [14] использован не совсем удачный критерий соотношения предельных давлений (прочности) и массы конструкции, имеющий размерность МПа/кг. Ниже вопрос эффективности будет рассмотрен отдельно. В данном случае интерес представляет возможность дополнительной оценки повышения предельной прочности за счёт НЛУ и её сравнение с результатами упругого анализа (рис. 6).

Сравнение показывает, что с позиции предельного пластического состояния эффект повышения прочности существенно больше. Однако анализ предельного состояния не выявляет отрицательных эффектов – возможного снижения прочности от применения НЛУ.

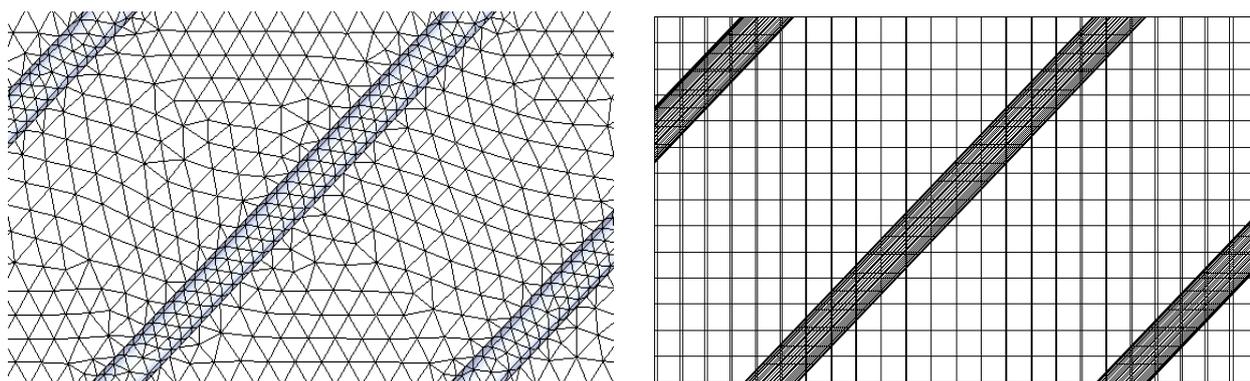


**Рис. 6. Сравнение коэффициентов повышения прочности по предельному пластическому состоянию (а) и в упругой стадии работы (б) обшивки с НЛУ в зависимости от радиусов сечений полос (20–50 мм) и интервалов размещения (300, 500, 700 мм) при угле 45 градусов**

Fig. 6. Comparison of the coefficients of strength increase in the limiting plastic state (a) and in the elastic stage of operation (b) of the lining with EIR depending on the radii of the strip sections (20–50 mm) and the placement intervals (300, 500, 700 mm) at an angle of 45 degrees

**Анализ несущей способности в области больших прогибов**

Работа обшивки с НЛУ в процессе длительной эксплуатации судов не может быть ограничена только упругой стадией или предельным пластическим состоянием. В результате износа и перегрузок неизбежны значительные остаточные прогибы. Величину допускаемых остаточных прогибов можно оценить как 1/20 от меньшей стороны пластины. В данном случае это прогибы до 35 мм. Исследования работы моделей при больших прогибах выполнено в программах SolidWorks и ANSYS для возможности сравнений. При решении этой задачи были выявлены проблемы с моделями в ANSYS при использовании сетки с треугольными конечными элементами. В результате были использованы модели с разными сетками (рис. 7).



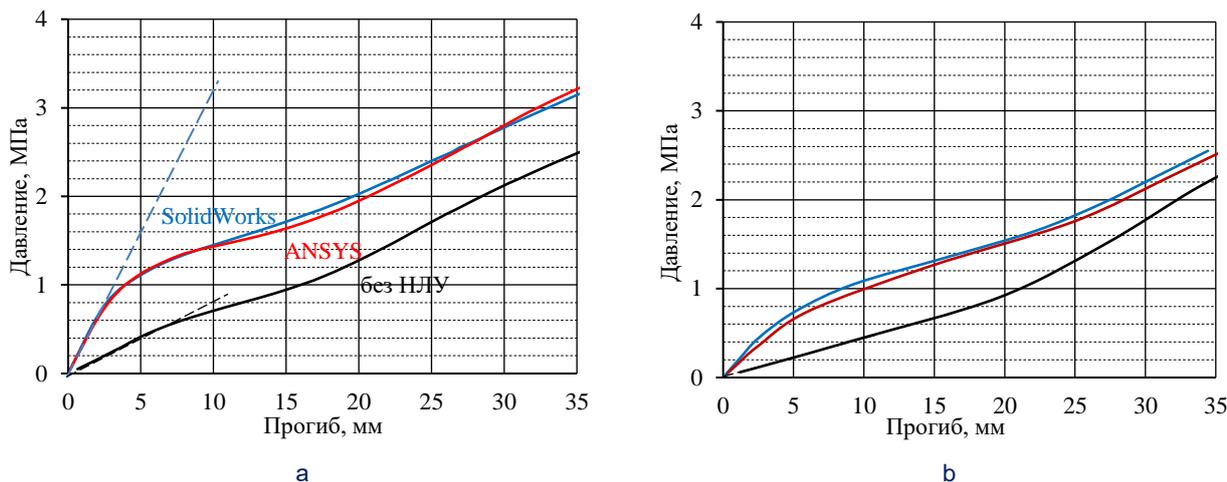
**а) расчёт – 19 минут, прогиб – 53 мм**  
a) calculation of 19 minutes, deflection of 53 mm

**б) расчёт – 30 минут, прогиб – 65 мм**  
b) calculation of 30 minutes, deflection of 65 mm

**Рис. 7. Сравнение сеток конечных элементов в моделях SolidWorks (а) и ANSYS (б)**

Fig. 7. Comparison of finite element grids in the SolidWorks (a) and ANSYS (b) models

Результаты расчётов и сравнения представлены на рис. 8. Несмотря на отличия сеток обе программы дают близкие решения (рис. 8а). Влияние НЛУ на прочность наиболее значительно в упругой стадии (повышение в 4 раза), при прогибах 10 мм почти 2-кратное, а с ростом прогибов до 35 мм снижается до 1,3 раза.



**Рис. 8. Сравнения решений в разных программах (а) и при разных углах в SolidWorks (b) для радиуса полос 37,5 мм и интервала размещения 700 мм**

**Fig. 8. Comparisons of solutions in different programs (a) and at different angles in SolidWorks (b) for a strip radius of 37.5 mm and a placement interval of 700 mm**

Модель изолированной пластины (рис. 8а) показывает большую жёсткость и прочность (примерно в 1,7 раза), чем модель из 4-х пластин (рис. 8б), благодаря близости и влиянию опорного контура. С ростом прогибов отличие снижается до 1,2 раза. Для практики следует рекомендовать модели с удалением опорного контура от границ зоны ледовых давлений.

### Сравнительный анализ эффективности НЛУ

Кроме повышения прочности для практики проектирования НЛУ важны и критерии эффективности, так как заданному (желаемому) уровню прочности может соответствовать множество вариантов конструктивных решений. Для формирования такого критерия в безразмерном виде предлагается позитивный фактор – повышение прочности разместить в числителе, а негативный – рост массы разместить в знаменателе критерия. Тогда для условий упругого состояния в зависимости от напряжений критерий эффективности имеет вид:

$$f = \frac{1 - \sigma_1/\sigma_0}{m_1/m_0 - 1}, \tag{1}$$

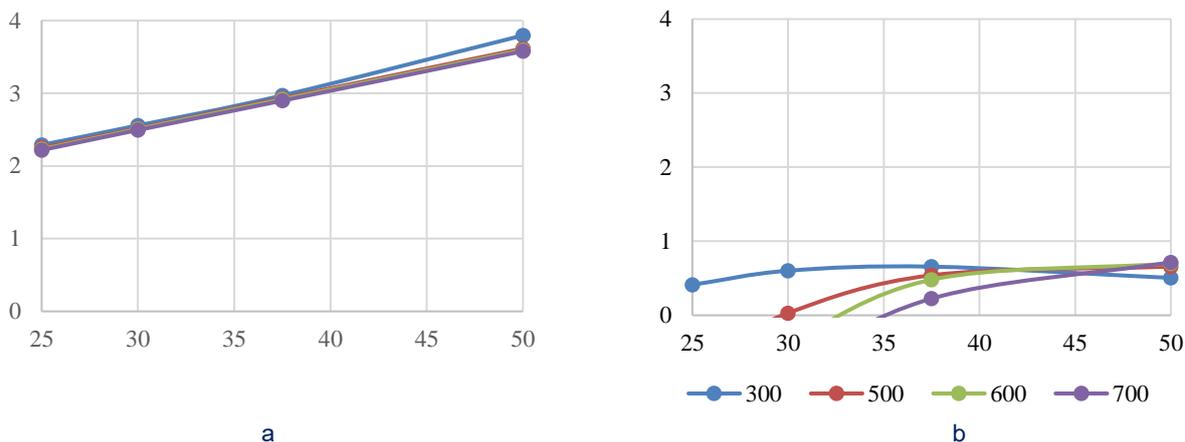
где  $\sigma_1$  – наибольшие приведённые напряжения в элементах конструкции с НЛУ;  
 $\sigma_0$  – наибольшие приведённые напряжения в обшивке без НЛУ;  
 $m_1$  – масса модели конструкции с НЛУ;  
 $m_0$  – масса модели обшивки без НЛУ.

Аналогичный критерий для условий предельного пластического состояния можно представить в виде функции от расчётных предельных ледовых давлений (прочности):

$$f_0 = \frac{p_1/p_0 - 1}{m_1/m_0 - 1}, \tag{2}$$

где  $p_1$  – максимум предельного давления для конструкции с НЛУ;  
 $p_0$  – максимум предельного давления для обшивки без НЛУ.

Сравнения на основе критериев эффективности (1) и (2) представлены на рис. 9. Критерий (2) для предельного состояния всегда положительный, почти линейно нарастает с увеличением радиуса сечения полос и практически не зависит от интервала их размещения (рис. 9а). Критерий (1) имеет существенно меньшие значения со значительным влиянием как радиусов полос, так и интервалов размещения (рис. 9б). Кроме того, критерий (1) позволяет контролировать условие отрицательного эффекта – роста напряжений из-за НЛУ (значения менее 0).

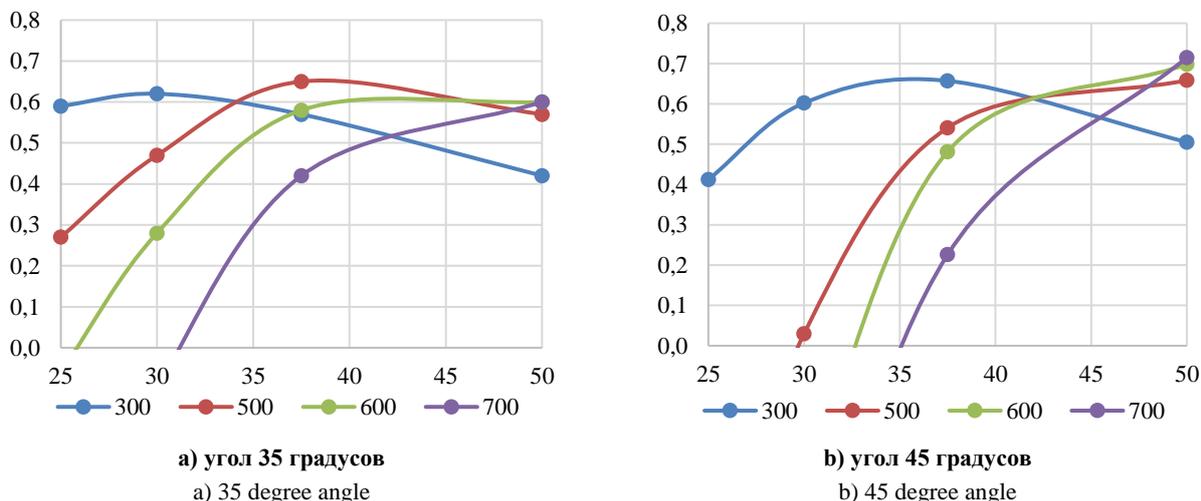


**Рис. 9. Сравнения эффективностей конструктивных решений с НЛУ по условию предельной пластической прочности (а) и в упругой стадии работы (б) в функции от радиусов сечений полос в диапазоне 25–50 мм, при разных интервалах (300–700 мм) и для угла 45 градусов**

Fig. 9. Comparisons of the efficiencies of EIR design solutions under the condition of maximum plastic strength (a) and in the elastic stage of operation (b) as a function of the radii of the strip sections in the range of 25–50 mm, at different intervals (300–700 mm) and for an angle of 45 degrees

С учётом выполненных сравнений критерий (1) представляется более чувствительным и важным для практики проектирования НЛУ, учитывая разнообразие условий длительной работы судов с возможностью появления усталостных и даже хрупких трещин в НЛУ при низких температурах.

На рис. 10 более укрупнённо дано сравнение при двух углах наклона полос НЛУ с разными радиусами сечений и интервалами размещения. Здесь видно, что зона отрицательных эффективностей смещается по шкале радиусов сечений полос, а их максимальные значения зависят от интервалов размещения.



**Рис. 10. Сравнения эффективностей НЛУ в упругой стадии при разных углах положения**

Fig. 10. Comparisons of the efficiency of EIRs in the elastic stage at different angles of position

Представленные результаты и сравнения позволяют говорить о возможностях поиска и выбора оптимальных конструктивных решений при проектировании НЛУ в конкретных условиях. Такие задачи потребуют наложения ограничений, связанных не только с уходом от зоны отрицательных эффективностей, но и ограничений, связанных с запасами прочности бортового набора. Причина в том, что НЛУ не столь существенно влияют на прочность бортового набора и не исключают возможности его повреждений после реализации НЛУ.

## Заключение

В работе рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с прямыми расчётами ледовой прочности судов и её повышением за счёт НЛУ. Отмечено, что для решения таких задач требуются не только параметры ледовой нагрузки, которые регламентируют Правила, но и форма её эпюры. В данном случае применялась пиковая эпюра давлений в виде треугольной призмы. Отмечен ряд возможных решений – от аналитических до численных – на базе МКЭ с различными условиями моделирования. Показаны возможности решения задачи на основе балочных моделей МКЭ с необходимостью уточнения концепции «присоединённых поясков». Однако приоритет предлагается отдавать пластинчатым моделям МКЭ, которые в более полной мере выявляют резервы прочности и специфику поведения связей при локальных ледовых давлениях. На основе таких моделей выполнены вариантные расчёты в двух программах с разными сетками КЭ как в упругой стадии, так и в области текучести с большими прогибами. Рассмотрены различные варианты конструктивных решений по НЛУ с разными радиусами сечений полос, интервалами размещения и углами положения к горизонту. Предложены критерии для оценки эффективности НЛУ. Выполнены сравнения разных решений по прочности и эффективности. Выявлены особенности для учёта в случае оптимизации НЛУ. Результаты работы вносят существенный вклад в методическое обеспечение практики применения НЛУ, которые пока не являются «эталонными» конструкциями [15]. Результаты могут использоваться для регламентации НЛУ, их проектирования в условиях судостроения и судоремонта.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность студентам Д.Н. Софроновой, А.И. Швецову и Нгуен Тунг Лам из группы М3123 Департамента морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ за помощь в проведении расчётов для вариантов конструктивных решений.

### ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С.В. Каленчук – расчёты и анализ прочности на балочных моделях; А.В. Котлярский – описание опыта проектирования и эксплуатации, расчёты прочности в среде Solidworks, перевод текста на английский язык; В.А. Кулеш – аналитические оценки прочности, сравнительный анализ эффективности, общий анализ результатов и заключение по работе; Хиен Чунг Фам – расчёты прочности в среде ANSYS.

S.V. Kalenchuk – calculations and analysis of strength on beam models; A.V. Kotlyarsky – description of the design and operation experience, strength calculations in the Solidworks system, translation of the text into English; V.A. Kulesh – analytical strength assessments, comparative efficiency analysis, general analysis of results and conclusion on the work; Hiep Trung Pham – strength calculations in the ANSYS environment.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interest.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов Ю.Н., Фадеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. Прочность судов, плавающих во льдах. Судостроение. Ленинград, 1967. 224 с.
2. Курдюмов В.А., Тряскин В.Н., Хейсин Д.Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ, сборник «Ледопроеходимость и ледовая прочность судов». Ленинград, 1979. С. 3–12.
3. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Копилец Н.Ф., Дидковский А.В. О проекте новой редакции требований Правил РМРС к ледовой прочности судов и ледоколов // Судостроение. 1997. № 5. С. 10–20.
4. Апполонов Е.М., Нестеров А.Б., Тимофеев О.Я. Обеспечение ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений // Труды ЦНИИ Крылова. 2008. Вып. 39(323). С. 69–89.
5. Руководство по оценке напряжённо-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе МКЭ. НД № 2–030101–045. РМРС. СПб., 2021. 11 с.

6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. РМРС. СПб., 2024.
7. Finite element analysis. Class guideline – DNVGL-CG-0127, 2015. 93 p.
8. Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Zhitnikov I.V. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service // *Proceedings of the 24<sup>th</sup> Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures*. Vladivostok, 2010. P. 150–153.
9. Каленчук С.В., Кулеш В.А. Ледовая прочность корпусов морских судов. Этапы развития, проблемы и перспективы // *Вестник ДВГТУ*. 2010. № 3(5). С. 137–151.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. РМРС, Дополнительные символы. СПб., 2023. 477 с.
11. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls // *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 9–14.
12. Кулеш В.А., Огай С.А., Пец Н.Г. Проект ледовых усилений сухогрузного судна // *Морские интеллектуальные технологии*. 2017. Т. 2, № 3(37). С. 64–70.
13. Кулеш В.А., Пец Н.Г., Приемкин А.В. Анализ опыта эксплуатации и эффективности наружных ледовых усилений корпуса // *Научно-технический сборник РМРС*. 2019. № 56/57. С. 84–93.
14. Кулеш В.А., Пец Н.Г. Эффективность наружных ледовых усилений с наклоном полос // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. Т. 2, № 1. С. 71–81.
15. Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Ч.Х. Проблемы ледовой регламентации «не эталонных» конструкций // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 3, ч. 3. С. 23–29.

## REFERENCES

1. Popov Yu.N., Fadeev O.V., Heisin D.E., Yakovlev A.A. The strength of ships floating in ice. *Shipbuilding*. Leningrad, 1967. 224 p. (In Russ.).
2. Kurdyumov V.A., Tryaskin V.N., Heisin D.E. Determination of ice load and assessment of ice strength of hulls of transport vessels. *Proceedings of the LKI, collection "Ice Permeability and Ice Strength of Ships"*. Leningrad, 1979, pp. 3–12. (In Russ.).
3. Apollonov E.M., Nesterov A.B., Kopilets N.F., Didkovsky A.V. On the draft of a new edition of the requirements of the RMRS Rules for the ice strength of ships and icebreakers. *Shipbuilding*, 1997, no. 5, pp. 10–20. (In Russ.).
4. Apollonov E.M., Nesterov A.B., Timofeev O.Ya. Ensuring ice strength and safe operation of ships in the Russian Arctic and freezing seas based on an integrated system for the formation of fundamental engineering solutions. *Proceedings of the Krylov Central Research Institute*, 2008, vol. 39(323), pp. 69–89. (In Russ.).
5. Guidelines for assessing the stress-strain state of ship hull structures based on FEM. ND No. 2-030101-045. RMRS. St. Petersburg, 2021. 11 p. (In Russ.).
6. Rules for the classification and construction of naval vessels. Part II. Body. RMRS. St. Petersburg, 2024. (In Russ.).
7. Finite element analysis. Class guideline – DNVGL-CG-0127. 2015. 93 p.
8. Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Zhitnikov I.V. Solutions for ice strength of hulls of vessels in service. *Proceedings of the 24th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meetings on Marine Structures*, 2010, pp. 150–153.
9. Kalenchuk S.V., Kulesh V.A. Ice strength of hulls sea vessels. Stages of development, problems and prospects. *Bulletin of DVG TU*, 2010, no. 3(5), pp. 137–151. (In Russ.).
10. Rules of classification and construction of naval vessels. Part XVII. RMRS, Additional Symbols. St. Petersburg, 2023. 477 p. (In Russ.).
11. Kulesh V.A. Improving operational reliability of ice reinforcements of vessels hulls. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
12. Kulesh V.A., Ogai S.A., Petz N.G. Project of ice reinforcements of a dry cargo vessel. *Marine Intelligent Technologies*, 2017, vol. 2, no. 3(37), p. 64–70. (In Russ.).
13. Kulesh V.A., Petz N.G., Priemkin A.V. Analysis of operational experience and effectiveness of external ice reinforcements of the hull. *Scientific and Technical Collection of the RMRS*, 2019, no. 56/57, pp. 84–93. (In Russ.).
14. Kulesh V.A., Petz N.G. Efficiency of external ice reinforcements with a strip slope. *Marine Intelligent Technologies*, 2020, vol. 2, no. 1, pp. 71–81. (In Russ.).
15. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Surov O.E., Pham Ch.Kh. Problems of ice regulation "non-reference" structures. *Marine Intelligent Technologies*, 2023, no. 3, part 3, pp. 23–29. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Каленчук Сергей Всеволодович** – кандидат технических наук, главный специалист, Дальневосточный центр судостроения и судоремонта (Владивосток, Российская Федерация),

✉ skalenchuk@mail.ru

**Sergei V. Kalenchuk**, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, Far-Eastern Shipbuilding and Repair Center (Vladivostok, Russian Federation).

**Котлярский Александр Витальевич** – магистрант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ kotliarskii.av@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8494-5614>

**Alexander V. Kotlyarsky**, Master's Student, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

**Кулеш Виктор Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vkulesh@mail.com

**Viktor A. Kulesh**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

**Фам Чунг Хиен** – кандидат технических наук, сотрудник, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

✉ phiepast07@gmail.com

**Hiep Trung Pham**, Candidate of Technical Sciences, Specialist, Shipbuilding Research Institute (Hanoi, Socialist Republic of Vietnam).

Статья поступила в редакцию / Received: 23.01.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 28.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025