

Научная статья

УДК 629.12

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/69-78>

Анализ несущей способности корпуса амфибийного судна с использованием численного моделирования

Фам Чунг Хиеп[✉], Нгуен Вьет Хоан, Ле Суан Чунг, Нгуен Ван Кьен, До Лыонг Банг

Исследовательский институт кораблестроения,

Ханой, Вьетнам

✉ phiepast07@gmail.com

Аннотация. В статье представлено исследование прочности конструкции корпуса амфибийного судна методом конечных элементов при типовых эксплуатационных нагрузках. Результаты численного моделирования показали, что исходная конструкция не в достаточной мере обеспечивает требуемую прочность при сложных динамических воздействиях. После усиления в зонах концентрации напряжений прочностные характеристики корпуса соответствуют требованиям Правил Вьетнамского Регистра и национальных технических стандартов для транспортных средств. Полученные результаты служат научной основой для разработки отечественных многоцелевых средств, способных удовлетворить растущие потребности Вьетнама в области обороны, гражданской эксплуатации и аварийно-спасательных операций.

Ключевые слова: амфибийное судно, прочность корпуса, динамическая нагрузка, метод конечных элементов, судовая конструкция, усиление конструкции

Для цитирования: Фам Чунг Хиеп, Нгуен Вьет Хоан, Ле Суан Чунг, Нгуен Ван Кьен, До Лыонг Банг. Анализ несущей способности корпуса амфибийного судна с использованием численного моделирования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 69–78.

Original article

Numerical evaluation of load-bearing capacity of an amphibious hull

Pham Trung Hiep[✉], Nguyen Viet Hoan, Le Xuan Chung, Nguyen Van Kien, Do Luong Bang

Institute of Ship Design, Hanoi, Vietnam

✉ phiepast07@gmail.com

Abstract. The article presents a structural strength analysis of an amphibious hull using the finite element method under typical operational loads. Numerical simulation results revealed that the original design does not sufficiently ensure structural integrity under complex dynamic conditions. After reinforcing critical stress concentration zones, the hull structure meets the strength requirements of the Vietnam Register regulations and national technical standards for road vehicles. The findings provide a scientific basis for the development of domestic multi-purpose platforms capable of addressing Vietnam's growing needs in defense, civil applications, and emergency rescue operations.

Keywords: amphibious vessel, hull strength, dynamic loading, finite element analysis, ship structure, structural reinforcement

For citation: Pham Trung Hiep, Nguyen Viet Hoan, Le Xuan Chung, Nguyen Van Kien, Do Luong Bang. Numerical evaluation of load-bearing capacity of an amphibious hull. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 69–78. (In Russ.).

Введение

Амфибийные суда представляют собой эффективное решение для эксплуатации в районах со сложным рельефом – прибрежных, речных и болотистых зонах. Их способность передвигаться как по воде, так и по суше обеспечивает универсальность применения в обороне, спасательных операциях, а также в гражданской и хозяйственной сферах.

В настоящее время многие страны инвестируют в разработку и массовое внедрение амфибийных судов в интересах армии, спасательных служб и гражданского сектора. Среди признанных лидеров в этой области – США, Новая Зеландия, Великобритания, Германия и Япония, которые уже представили целый ряд высокотехнологичных моделей.

Одним из наиболее известных примеров является десантное амфибийное судно Sealegs (рис. 1), разработанное компанией Sealegs International Ltd (Окленд, Новая Зеландия) [1]. Корпус судна изготовлен из алюминия. Оно оснащено гидравлической системой с тремя подъёмно-опускаемыми колёсами: одним передним и двумя задними, которые приводятся в действие бензиновым двигателем, размещённым на палубе. Судно Sealegs широко применяется в сфере отдыха, коммерческой деятельности, а также в спасательных операциях и оборонной промышленности, включая подразделения специального назначения военно-морских сил. С 2005 по 2015 год более 1000 единиц было поставлено в 50 стран, что подтверждает его устойчивые позиции на мировом рынке амфибийных транспортных средств.



Рис. 1. Амфибийная лодка Sealegs, Новая Зеландия

Fig. 1. Sealegs Amphibious Boat, New Zealand

В России идея создания амфибийных транспортных средств имеет длительную историю – от бронетранспортёра БТР-60Р до современных судов на воздушной подушке, однако сегмент гражданских «лодок на колёсах» остаётся слабо развитым. В последние годы растёт интерес к таким судам в связи с развитием туризма в отдалённых регионах (Камчатка, Байкал, Арктика) и необходимостью проведения спасательных операций в зонах затоплений. Несмотря на отдельные частные и научно-технические инициативы, в стране отсутствует системный подход к проектированию и стандартизации амфибийных судов с колёсным приводом. В отличие от судов на воздушной подушке и подводных крыльях, для которых разработаны ГОСТ и ОСТ, подобные амфибии не имеют формализованных требований, что затрудняет сертификацию и серийное производство [2, 3].

Во Вьетнаме амфибийный транспорт рассматривается как перспективное направление с учётом природных условий, развитой речной сети и актуальных задач в сфере ликвидации последствий стихийных бедствий, спасательных и пограничных операций. Однако разработки в этой области ограничиваются научными проектами и испытаниями, проводимыми в отдельных научных и оборонных учреждениях. Исследования сосредоточены на конструктивных, гидродинамических и эксплуатационных аспектах с использованием современных САЕ-инструментов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). Отсутствие проектных стандартов и серийного производства сдерживает развитие, оставляя эту сферу в экспериментальной стадии без системной инвестиционной поддержки [4].

Сведения о судне

Проектируемое амфибийное судно (рис. 2) предназначено для проведения оперативных спасательных операций в речных и прибрежных зонах. Корпус изготовлен из алюминиевого сплава, надстройка – из композитных материалов. Длина судна составляет 6,73 м, ширина – 2,2 м, высота борта – 0,95 м. Вместимость – до 6 человек. Максимальная скорость на воде достигает 30 узлов. Амфибийность обеспечивается тремя колёсами на подвесной системе с гидравлическими цилиндрами, управляемыми независимо. Скорость движения по суше – до 10 км/ч.

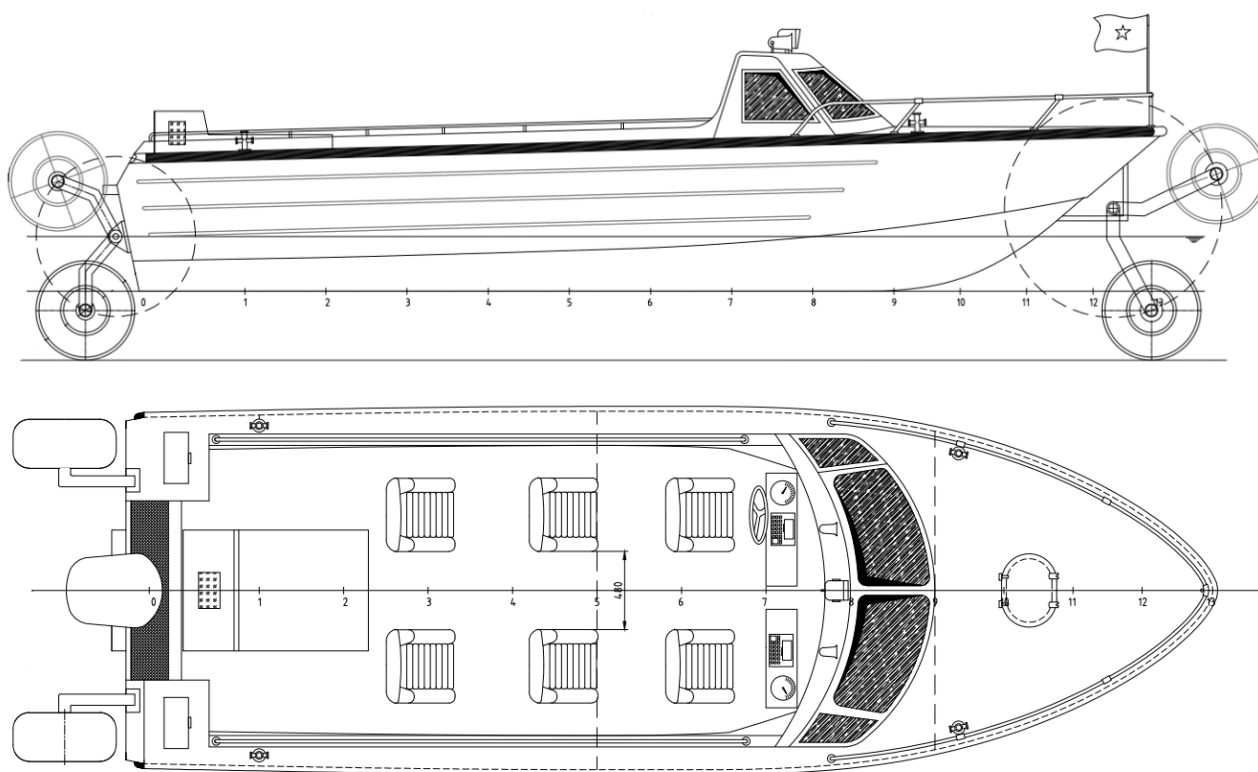


Рис. 2. Общая компоновка судна

Fig. 2. General layout of the designed vessel

Судно спроектировано в соответствии с Правилами Вьетнамского Регистра (ВР) [5, 6] и национальным техническим стандартом для транспортных средств [7]. Конструкция каркаса корпуса выполнена по комбинированной схеме, обеспечивающей высокую жёсткость и устойчивость к нагрузкам как на воде, так и на суше (рис. 3). Толщина обшивки корпуса составляет 4 мм в нижней части и 3 мм – в остальных зонах.

С учётом амфибийных характеристик судна его корпус должен обеспечивать прочность при эксплуатации как на воде, так и на суше. При наземном передвижении судно опирается на три колеса без амортизационной системы, что приводит к значительным динамическим нагрузкам от неровностей дороги. Поскольку все силовые элементы крепятся непосредственно

ственно к корпусу, он выполняет несущую функцию, требующую прочностного анализа в статических и динамических режимах.

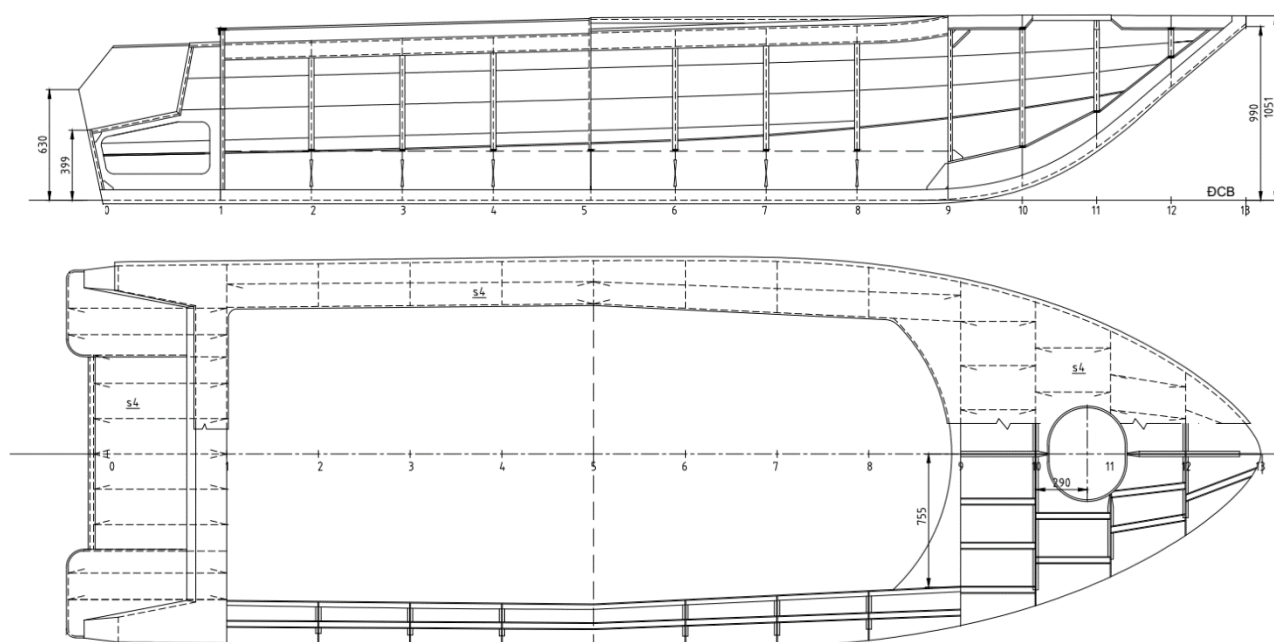


Рис. 3. Конструкция спроектированного судна

Fig. 3. Structure of the designed vessel

Проверка прочности спроектированной конструкции

При проектировании амфибийного судна ключевое значение имеет прочностной анализ при движении по суше, обеспечивающий безопасность и надёжность конструкции. Исследование сосредоточено на численном моделировании типовых нагрузок для оценки устойчивости, усталостной прочности и концентрации напряжений в критических зонах. В рамках работы рассматриваются три основные задачи:

Задача 1: Статическая нагрузка при полной массе. Моделируется сценарий стоянки судна на суше с полной нагрузкой – включая собственный вес, экипаж, груз, топливо и оборудование. Нагрузка передаётся через колёса на точки контакта с поверхностью. Задача позволяет определить распределение напряжений и прогиб конструкции в статических условиях.

Задача 2: Резкое торможение на сухопутной скорости. Рассматривается случай движения судна по дороге на максимальной скорости с последующим экстренным торможением. В результате возникают инерционные нагрузки, воздействующие на корпус. Анализ проводится для оценки прочности соединений между каркасом, подвеской и другими несущими элементами конструкции в условиях динамических перегрузок.

Задача 3: Движение по неровной поверхности. Оцениваются циклические нагрузки и удары при движении по пересечённой местности, например по камням или ямам. Моделирование направлено на анализ усталостной прочности конструкции, распределения динамических напряжений и риска образования усталостных трещин в сварных швах, болтовых соединениях и в местах крепления колёс.

На рис. 4 представлено распределение массы по основным элементам судна. Масса корпуса (позиция 1) составляет 0,771 т; масса системы управления (2) – 0,4 т; трансмиссии (3) – 0,7 т; подвесной мотор (4) – 0,07 т. Масса одного посадочного места с экипажем (позиции 5–10) – 0,12 т.

Следует отметить, что в соответствии с установленными требованиями допускается расчёт конструктивных элементов корпуса судна с использованием допускаемых напряжений, составляющих 0,75 от предела текучести материала [5, 6]. В рассматриваемом случае предел текучести применяемого алюминиевого сплава составляет 276 МПа.

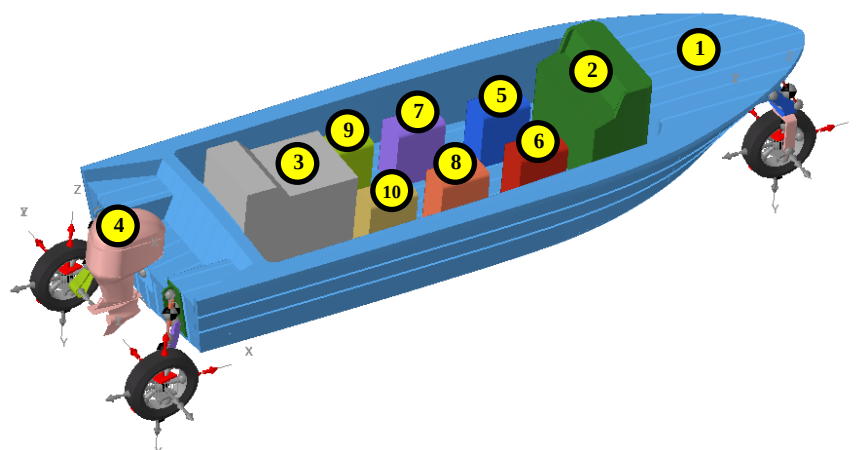


Рис. 4. Распределение нагрузки на судне

Fig. 4. Load distribution on the vessel

Анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции проводится МКЭ с использованием программного комплекса HyperWorks, без учёта износа [8].

На рис. 5 показаны настройки моделирования для задач 1 и 2. В первом случае, помимо собственного веса корпуса судна, на него также действуют силы, обусловленные массой установленных на судне устройств. Эти силы приложены в центры масс устройств и воздействуют непосредственно на точки их соединения с корпусом. В задаче 2 рассматривается случай, когда судно движется на максимальной скорости, после чего происходит резкое торможение. Максимальное замедление, зависящее от коэффициента сцепления ϕ между шинами и дорогой, может достигать максимума 8 м/с^2 [9, 10–11]. В этом случае, помимо сил, действующих на корпус судна в статической ситуации, появляются дополнительные инерционные силы, вызванные резким торможением.

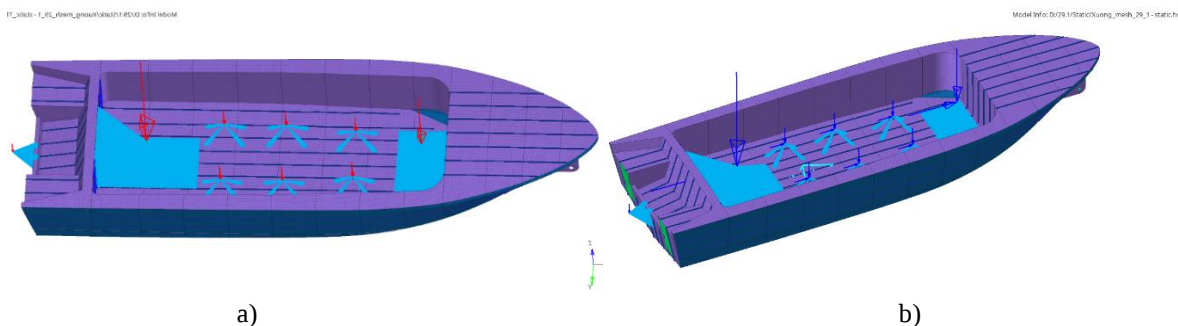


Рис. 5. Расчётные установки для задачи 1 (a) и задачи 2 (b)

Fig. 5. Computational setups for Case 1 (a) and Case 2 (b)

Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкции корпуса для задач 1 и 2 представлены на рис. 6 и в табл. 1. Расчёты показали, что максимальные напряжения, действующие на конструкцию судна при проверке прочности, возникают в области двойного дна, особенно в местах соединения с трансмиссионной системой. В случае максимальной нагрузки (Задача 2) максимальное напряжение составляет $\sigma_{\max} = 94,32 \text{ МПа}$, что соответствует допустимым пределам прочности. Таким образом, конструкция корпуса судна удовлетворяет необходимым требованиям прочности согласно проектным спецификациям.

Максимальное измеренное смещение составляет $8,28 \text{ мм}$, сосредоточенное в области двойного дна. Однако оно остаётся в пределах допустимого и не оказывает влияния на динамические характеристики или стабильную работу установленных на корпусе механических систем. Распределение напряжений и смещений показывает тенденцию к увеличению вдоль продольной оси корпуса, что соответствует геометрическим особенностям и условиям опоры конструкции.

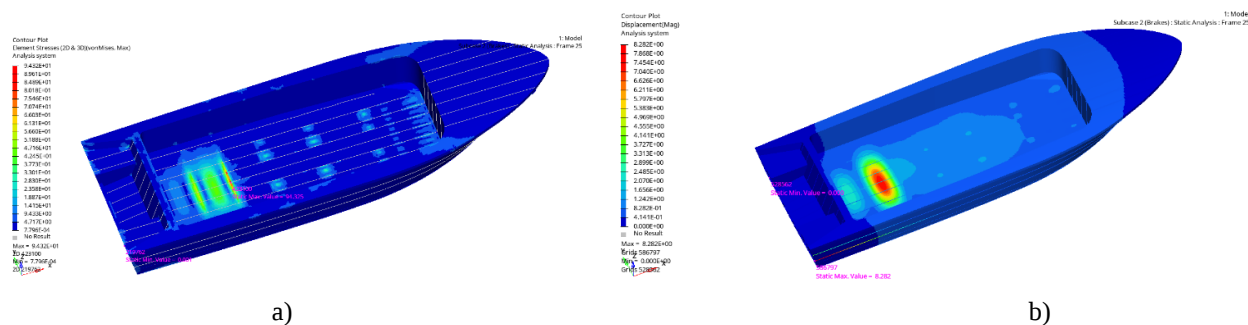


Рис. 6. Эпюр напряжений (а) и прогиба (б) судна в задаче 2
 Fig. 6. Stress (a) and deformation (b) diagrams of the boat in problem 2

Таблица 1 / Table 1

Максимальное напряжение (МПа) в элементах конструкции
 The maximum stress (MPa) in structural elements

№	Элемент конструкции	Задача 1	Задача 2
1	Наружная обшивка	11,58	15,90
2	Поперечные связи	28,62	47,41
3	Продольные связи	4,37	6,79
4	Настил второго дна	61,65	94,32

Таким образом, спроектированная конструкция судна полностью удовлетворяет требованиям прочности и гарантирует безопасность при эксплуатации на суше с расчётными нагрузками для двух рассматриваемых случаев.

Задача 3 представляет собой более сложный случай моделирования, связанный с движением амфибийного судна по неровной дороге со скоростью 10 км/ч. В данной ситуации конструкция подвергается не только инерционным нагрузкам, но и динамическому воздействию дорожных неровностей, представляющих собой вертикальные отклонения от номинального профиля. Эти неровности вызывают неравномерные импульсные нагрузки при контакте колёс с поверхностью, передающиеся на несущую систему «рама – корпус». В результате возникают циклические удары, вызывающие колебания, локальные концентрации напряжений и ускоренное развитие усталостных повреждений.

Для моделирования неровность дороги принимается в виде синусоиды с амплитудой h_0 и длиной волны L , как показано на рис. 7а. Мгновенная амплитуда колебаний поверхности дороги представляется математической функцией:

$$h(t) = h_0 \cdot \sin(pt), \quad (1)$$

где $h_0 = 20$ мм – амплитуда неровности, соответствующая условиям асфальтированных дорог [7];

$L = 1$ м – длина волны неровности;

$p = 2\pi \cdot \frac{V}{L}$ – частота возбуждения, зависящая от скорости движения V .

Соответствующая модель возбуждающего воздействия была построена в среде Nupur-Works (рис. 7б) для оценки динамического отклика конструкции при движении по неровной дороге.

Результаты расчётов показали, что в рассматриваемом сценарии максимальное напряжение в зоне соединения рамы передних опор с корпусом судна достигает 249,3 МПа, что превышает допустимые значения в 1,2 раза (рис. 8а). Особенно уязвимой оказалась конструкция передних опор, где напряжения достигают 712,4 МПа, что в 3,4 раза выше допустимого уровня (рис. 9а). В связи с этим требуется внести изменения в конструкцию и повторить расчёты с учётом обновлённых параметров.

На основе результатов анализа НДС, с целью повышения прочности и надёжности судна при движении по суше, в носовой части была добавлена L-образная накладка (L20×80×10 мм), соединяющая корпус с блоком рулевого колеса и проходящая от вершины носа до первой поперечной балки (рис. 10). Также были увеличены толщины наиболее нагруженных элементов: обшивка носовой части – с 4 до 8 мм, двойное дно – с 4 до 10 мм, поперечные балки – с 4 до 8 мм, кормовая часть – с 4 до 8 мм. Толщина U-образных накладок увеличена с 3 до 4 мм для повышения общей жёсткости конструкции.

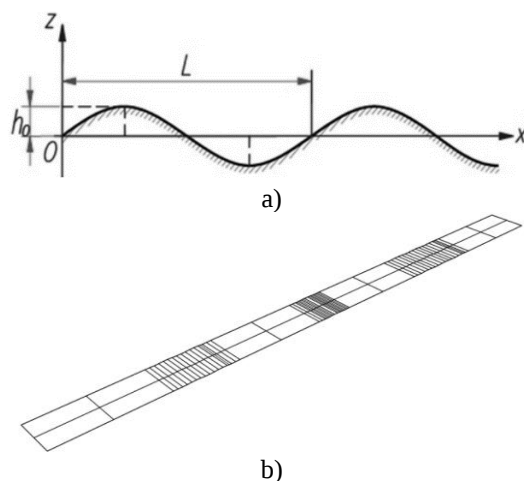


Рис. 7. Моделирование дорожного участка для расчётов: профиль поверхности дороги (a) и модель дороги в HyperWorks (b)

Fig. 7. Simulation of the road segment for calculations: road surface profile (a) and road model in HyperWorks (b)

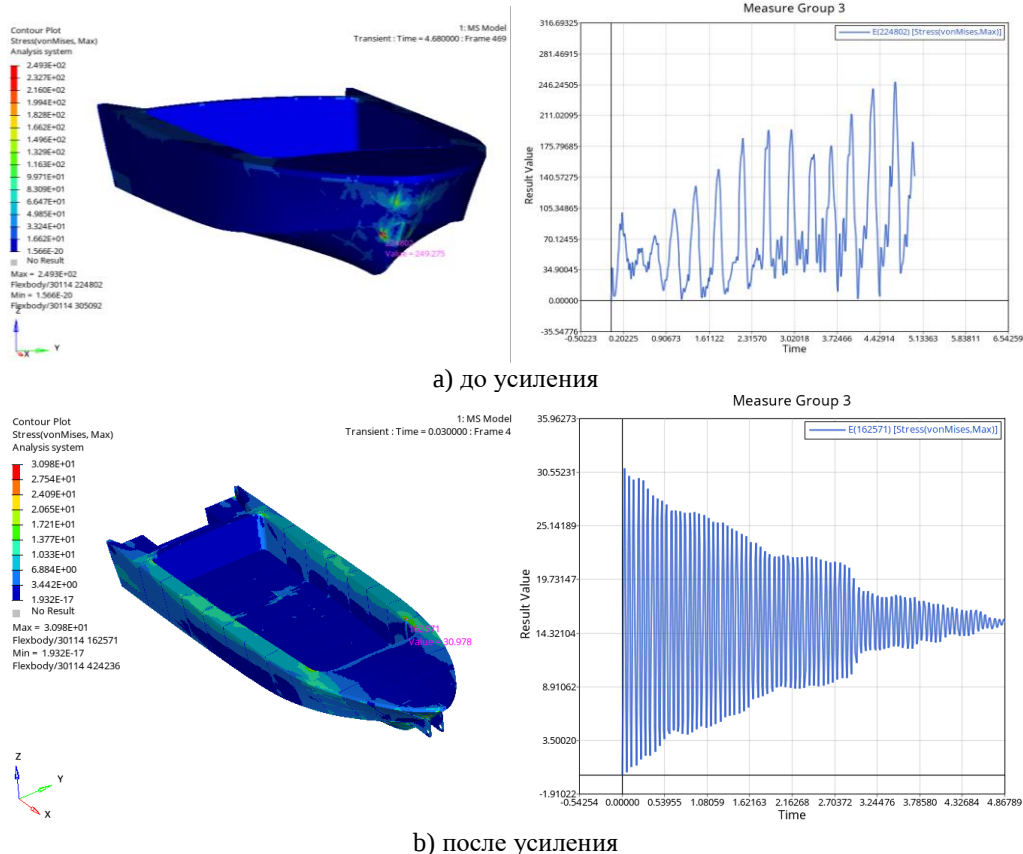


Рис. 8. Диаграмма напряжений элемента с максимальным напряжением на корпусе судна
Fig. 8. Stress diagram of the element with the maximum stress on the hull

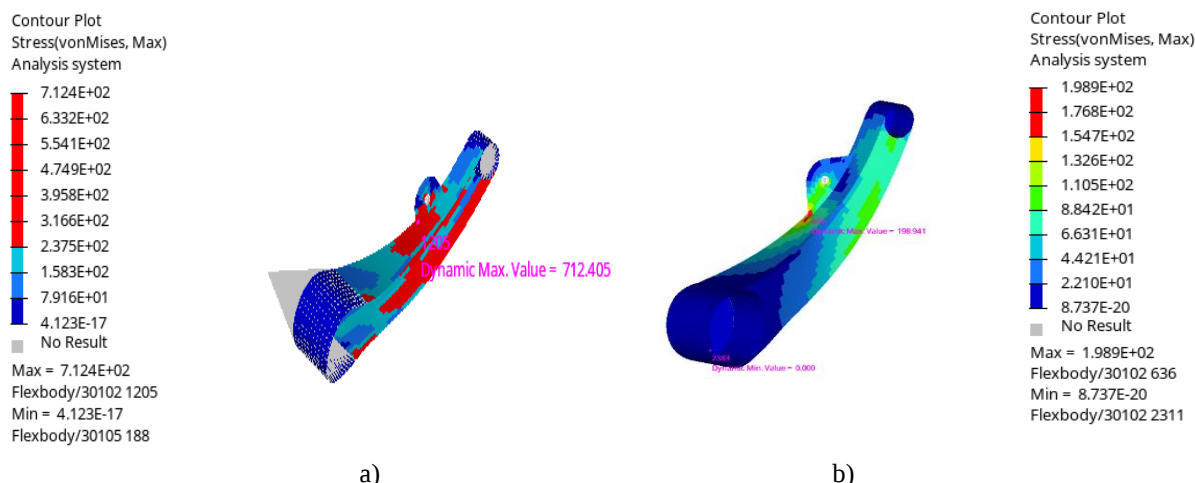


Рис. 9. Напряжения в опоре судна до усиления (а) и после усиления (б)

Fig. 9. Stress in the boat support before (a) and after (b) reinforcement

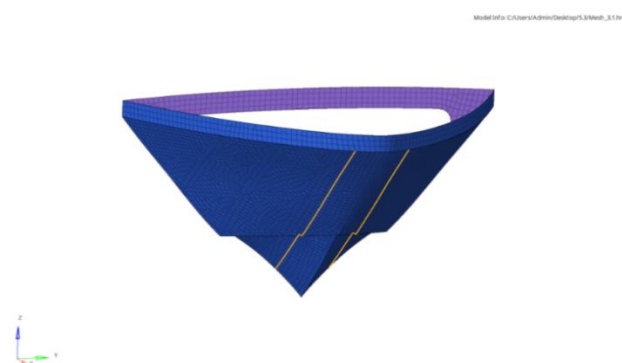


Рис. 10. Усиление в носовой части судна

Fig. 10. Reinforcement at the bow of the vessel

Опорный элемент выполнен в виде полого короба толщиной 24 мм, а проушина для крепления гидроцилиндра усилена до 50 мм, что обеспечивает необходимый запас прочности в критической зоне.

Результаты расчёта НДС корпуса после внесения конструктивных изменений показали существенное снижение напряжений в элементах конструкции. Максимальное напряжение уменьшилось в восемь раз и составило 30,98 МПа (рис. 8b). Особенно заметно снижение напряжений в районе опоры корпуса – с 712,4 до 198,9 МПа (в 3,6 раза) (рис. 9b). Это доказывает, что меры по усилению конструкции не только технически обоснованы, но и эффективны для увеличения срока службы и снижения риска усталостного разрушения.

Несмотря на то что модель хорошо отражает распределение напряжений и деформаций, следует отметить, что некоторые нелинейные факторы, такие как влияние основания, вынужденные колебания от двигателя или деградация физических свойств материала со временем, не были учтены в этом исследовании. Поэтому результаты необходимо подтвердить с помощью практических испытаний на следующем этапе, чтобы обеспечить высокую надёжность.

Заключение

В работе показана актуальность разработки амфибийных судов для спасательных операций в речных и прибрежных районах Вьетнама. Предложена конструкция корпуса и проведён её прочностной анализ методом конечных элементов при нагрузках, приближённых к реальным условиям эксплуатации. Расчёты выявили, что исходная конструкция не во всех сценариях обеспечивает прочность. После усиления конструкция соответствует требованиям Правил ВР и национальных нормативных документов. Результаты исследования могут служить основой для дальнейшей разработки амфибийных судов, способствуя развитию отечест-

венного судостроения. На следующем этапе рекомендуется провести натурные испытания прототипа для верификации расчётной модели и оптимизации проектных решений.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Фам Чунг Хиеп – анализ и интерпретация результатов, подготовка и редактирование текста; Нгуен Вьет Хоан, Ле Суан Чунг – разработка концепции и дизайна исследования; До Лыонг Банг, Нгуен Ван Кьен – сбор данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Pham Trung Hiep – analysis and interpretation of results, draft manuscript preparation; Nguyen Viet Hoan, Le Xuan Chung – study conception and design; Do Luong Bang, Nguyen Van Kien – data collection. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sealegs 12RC. URL: <https://www.boatingnz.co.nz/boat-reviews/sealegs-12rc/> (дата обращения: 15.04.2025).
2. Корабли ВМФ СССР. Справочник в четырех томах. Том IV. Десантные и минно-тральные корабли. СПб.: «Галея Принт», 2007. 188 с.
3. Федотов Д.Г. Методика проектирования гибкого ограждения амфибийных судов на воздушной подушке: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2007. 21 с.
4. Xuồng thủy khí. URL: <https://dantri.com.vn/> (дата обращения: 04.15.2025).
5. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về quy phạm phân cấp và đóng phương tiện thủy nội địa - QCVN 72: 2025/ BGTVT. Hanoi. 87 p. (На вьетн. яз.).
6. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về phân cấp và đóng tàu thủy cao tốc : QCVN 54: 2019/ BGTVT. Hanoi. 333 p. (На вьетн. яз.).
7. Luật giao thông đường thủy nội địa năm 2004 – Sửa đổi, bổ sung năm 2024. Hanoi. 40 p. (На вьетн. яз.).
8. ALTAIRE COMPANY, Hyperwork software, h015. URL: <https://altair.com/altair-hyperworks/> (дата обращения: 11.04.2025).
9. Sekulić D., Dedović V., Rusov S., Šalinić S., Obradović A. Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom // *Applied Mathematical Modelling*. 2023. № 37(18–19), pp. 8629–8640. (На англ. яз.).
10. ISO STANDARD: ISO 2631-5:2004: Mechanical vibration and shock. URL: <https://www.iso.org/standard/35595.html/> (дата обращения: 15.04.2025).
11. Owais Mustaffi Siddiqui. Dynamic analysis of a modern urban bus for assessment of ride quality and dynamlic wheel loads. Doctoral Thesis; Concordia University, Montrela, Canada, 2000. 184 p. (На англ. яз.).

REFERENCES

1. Sealegs 12RC. URL: <https://www.boatingnz.co.nz/boat-reviews/sealegs-12rc/> (accessed: 04.15.2025).
2. *Soviet Navy Ships*. Reference book in four volumes. Vol. IV: *Landing ships and mine warfare ships*. St. Petersburg: Galeya Print, 2007. 188 p. (In Russ.).
3. Fedotov D.G. *Methodology for designing a flexible skirt of amphibious air-cushion vehicles*: Abstract of Ph. D. (Eng.) thesis. St. Petersburg, 2007. 21 p. (In Russ.).
4. Xuồng thủy khí. URL: <https://dantri.com.vn/> (accessed: 04.15.2025).
5. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về quy phạm phân cấp và đóng phương tiện thủy nội địa - QCVN 72: 2025/ BGTVT. Hanoi. 87 p. (In Viet.).
6. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về phân cấp và đóng tàu thủy cao tốc : QCVN 54: 2019/ BGTVT. Hanoi. 333 p. (In Viet.).
7. Luật giao thông đường thủy nội địa năm 2004 – Sửa đổi, bổ sung năm 2024. Hanoi. 40 p. (In Viet.).
8. ALTAIRE COMPANY, Hyperwork software, 2015. URL: <https://altair.com/altair-hyperworks/> (accessed: 11.04.2025).
9. Sekulić D., Dedović V., Rusov S., Šalinić S., Obradović A. Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom. *Applied Mathematical Modelling*, 2023, no. 37(18–19), pp. 8629–8640.

10. ISO STANDARD: ISO 2631-5:2004: Mechanical vibration and shock.
URL: <https://www.iso.org/standard/35595.html/> (accessed: 04.15.2025).
11. Owais Mustaffi Siddiqui. Dynamic analysis of a modern urban bus for assessment of ride quality and dynamlic wheel loads. Doctoral Thesis; Concordia University, Montrela, Canada, 2000. 184 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фам Чунг Хиеп – кандидат технических наук, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Вьетнам),
✉ phiepast07@gmail.com

Pham Trung Hiep, Candidate of Engineering Sciences, Institute of Ship Design (Hanoi, Vietnam).

Нгуен Вьет Хоан – кандидат технических наук, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Вьетнам),
✉ viethoan@mail.ru

Nguyen Viet Hoan, Candidate of Engineering Sciences, Institute of Ship Design (Hanoi, Vietnam).

Лэ Суан Чунг – магистр, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Вьетнам),
✉ chungtk@gmail.com

Le Xuan Chung, Master Student, Institute of Ship Design (Hanoi, Vietnam).

Нгуен Ван Кьен – бакалавр, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Вьетнам),
✉ nguyenkien0802@gmail.com

Nguyen Van Kien, Bachelor, Institute of Ship Design (Hanoi, Vietnam).

До Лыонг Банг – магистр, Исследовательский институт кораблестроения (Ханой, Вьетнам),
✉ kidhh26@gmail.com

Do Luong Bang, Master Student, Institute of Ship Design (Hanoi, Vietnam).

Статья поступила в редакцию / Received: 26.05.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 19.08.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025.