

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.12

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/36-43>

В.А. Кулеш, О.Э. Суров, Фам Чунг Хиеп

КУЛЕШ ВИКТОР АНАТОЛЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, vkulesh@mail.ru

СУРОВ ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ – к.т.н., профессор, surov.oye@dvfu.ru

ФАМ ЧУНГ ХИЕП – аспирант, phiepast07@gmail.com.

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Анализ и усиление наливной баржи согласно условиям класса NAABSA1

Аннотация. Рассмотрены вопросы общей продольной, поперечной и местной прочности корпуса несамоходной наливной баржи дедвейтом 500 т с позиции взаимодействия с грунтом при осушениях. Работа выполнена для обоснования условий соответствия символу класса Регистра судоходства NAABSA1. Показана необходимость усиления киля в районе форпика. Предложена простая схема усиления киля, реализация которой обеспечивает безопасную эксплуатацию судна для условий NAABSA1 с посадками на грунт и осушениями.

Ключевые слова: наливная баржа, посадка на грунт, осушение, прочность, усиление киля

Для цитирования: Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Чунг Хиеп. Анализ и усиление наливной баржи согласно условиям класса NAABSA1 // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2(55). С. 36–43.

Введение

Морской транспорт играет ключевую роль в освоении и развитии Дальнего Востока и Арктического региона России. Низкая плотность населения, неразвитая портовая инфраструктура и суровый климат затрудняют эти процессы. Доставка грузов на необорудованные берега регионов может осуществляться специализированными судами, способными систематически взаимодействовать с грунтом и осушаться на нем. Транспортный флот России располагает сравнительно небольшими баржами советских проектов, которые устарели, повреждаются и не могут закрыть все потребности. Особый дефицит заключается в баржах для доставки нефтепродуктов. Постройка новых специализированных судов – дорогой и длительный процесс. Приведение судов, находящихся в эксплуатации, к условиям Регистра является востребованным. Как правило, оно связано с дополнительными, но относительно небольшими затратами для владельцев в основном на усиления корпусов. Примеров таких решений пока немного [1, 2].

В данной статье представлено обоснование условий соответствия символу класса NAABSA1 корпуса несамоходной наливной баржи «МНБ-500-002», используемой для доставки и разгрузки на необорудованный берег нефтепродуктов. Предложена схема усиления киля в районе форпика для указанного соответствия и снижения повреждаемости.

Несамоходная наливная баржа «МНБ-500-002» проекта 1632 имеет водоизмещение 761 т с размерами: длина расчётная – 47,5 м, ширина – 8,7 м, высота борта – 2,8 м и осадка – 2 м. Судно было построено в 1979 г. Функция доставки нефтепродуктов на необорудованный берег

с возможностью осушения и проведения грузовых операций на заранее подготовленных участках предусмотрена и оговорена в проектной документации. Баржа представляет собой морское стальное однопалубное судно с баком и квартердеком, с отделением вспомогательных механизмов и насосным отделением, расположенными в корме (рис. 1а).

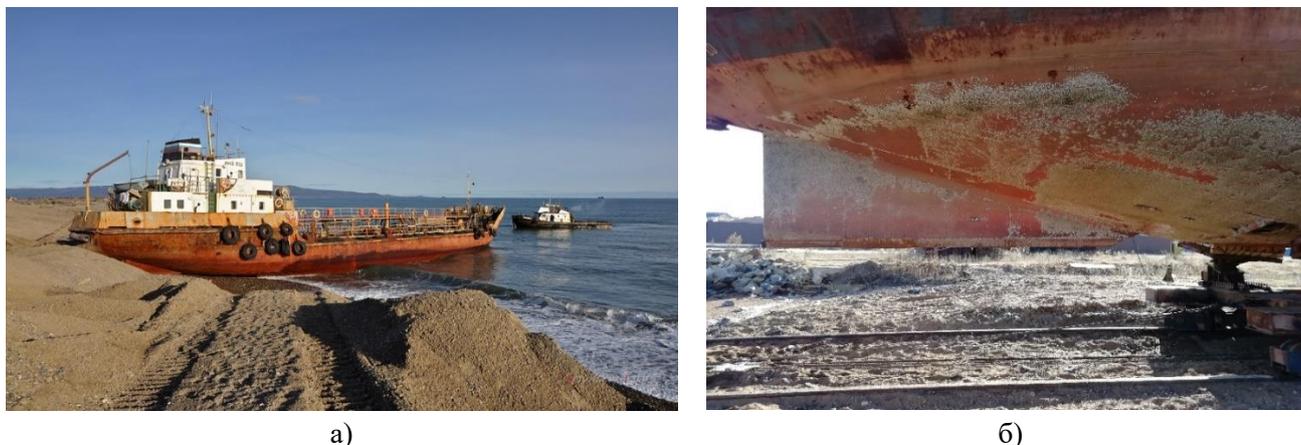


Рис. 1. Баржа при осушении на грунте кормой (а) [3] и потеря рулевого устройства (б)

Корпус судна имеет плоское одинарное дно и одинарные борта. Разбит поперечными переборками на 9 отсеков. Грузовые танки имеют продольные переборки в ДП. Система набора смешанная: днище в районе 24–68 шп. набрано по продольной системе; остальные конструкции – по поперечной. Поперечная шпация составляет 575 мм (10–70 шп.) и 500 мм в других районах.

Толщина горизонтального киля 10 мм, а обшивки днища и скулы – 8 мм. По всей длине судна установлены днищевые стрингеры сварного таврового профиля, а продольные днищевые балки полособульбового профиля установлены в районе 10-64 шп.

Форштевень – стальной, сварной из полосы 40×120 мм и прилегающих листов наружной обшивки толщиной 10 мм. Ахтерштевень – сварной, пятка сечением 180×120 мм – кованая. В эксплуатации судно осушалось на грунте при разных положениях к берегу (носом, лагом, под углом и кормой). В результате баллер, перо руля и пятка ахтерштевня были повреждены и демонтированы (рис. 1б). Эксплуатация судна продолжена без рулевого устройства.

Расчётные нагрузки

Расчётные давления на конструктивные элементы корпуса, непосредственно воспринимающие действие грунта, согласно [5]:

$$p_i = 10d_N (1 + 4 / \sqrt{A_i}) k_p, \tag{1}$$

где d_N – осадка на миделе при расчётном водоизмещении;

A_i – площадь зоны деформирования элемента при повреждении;

k_p – коэффициент запаса.

Концевые (носовая и кормовая) реакции взаимодействия корпуса и грунта:

$$R_N^m = g \Delta_N \left[\frac{\text{tg}(\psi_N - \psi_0 - \psi_S)}{6} \cdot \frac{L}{d_N} \right], \tag{2}$$

где Δ_N – расчётное водоизмещение;

ψ_N – угол наклона грунта вдоль судна;

ψ_0 – угол конструктивного дифферента;

ψ_S – угол эксплуатационного дифферента.

Значения по формуле (2) для данного судна и класса NAABSA1 должны быть не менее

$$R_N^m = 3g\Delta_N / 12 = 1866 \text{ кН.} \quad (3)$$

Расчётная нагрузка грунта для проверки поперечной прочности отсека:

$$Q_{0S} = k_\phi \cdot R_N^m \cdot \frac{L_{0S}}{L_{BN}} = 1949 \text{ кН,} \quad (4)$$

где $k_\phi = 1,5$; $R_N^m = g\Delta_N = 7465 \text{ кН}$;

$L_{0S} = 8,05 \text{ м}$ – длина отсека/танка судна;

$L_{BN} = 46,25 \text{ м}$ – расчётная длина судна по днищу.

Изгибающий момент для корпуса от носовой концевой реакции грунта:

$$M_N = -0,363 \cdot \Delta_N L = -13122 \text{ кН}\cdot\text{м.} \quad (5)$$

Общая продольная прочность

Проверка предельного момента сопротивления корпуса произведена при сочетании изгибающего момента от концевой реакции и прогибающего момента на тихой воде M_{SW} . Допускаемый остаточный предельный момент сопротивления поперечного сечения корпуса на конец срока службы должен быть не менее

$$W_{П(ДН)} = 1,1 \cdot \frac{|0,92M_N + M_{SW}|}{R_{eH}} \cdot 10^3 = 63146 \text{ см}^3, \quad (6)$$

где R_{eH} – верхний предел текучести, МПа.

Расчётный остаточный предельный момент сопротивления корпуса определён по схеме эквивалентного бруса (рис. 2). Здесь красным цветом выделены «гибкие» связи, исключаемые из состава эквивалентного бруса в предположении потери устойчивости при сжатии. Синим цветом выделены связи, которые предположительно будут деформированы на пределе ширины, допускаемой Регистром, они также исключаются из состава эквивалентного бруса. Черным цветом выделены «жесткие» связи.

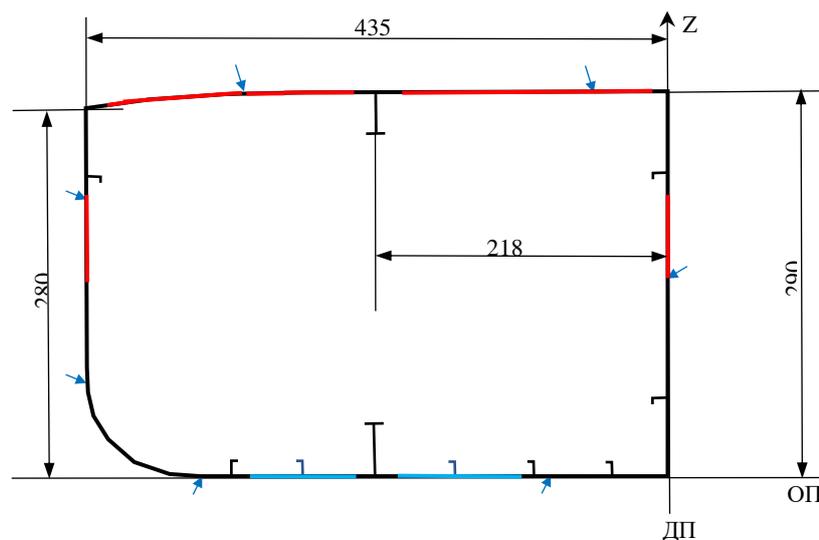


Рис. 2. Схема эквивалентного бруса баржи

Расчеты выполнены для прогиба корпуса как при нулевых износах, так и при износах всех связей на уровне нормативных ограничений. Для связей борта и днища в районах усиленных (ледовых и от грунта) износ задан 20%, для прочих – 30%. В результате учёта износа и

исключения конструктивных связей (гибких и поврежденных) площадь поперечного сечения эквивалентного бруса уменьшается более чем в 2 раза.

По результатам выполненных расчётов предельные моменты сопротивления корпуса:

– для палубы

$$W_{II} = \frac{J}{H_m - e} = 680 > [631] \text{ см}^2 \cdot \text{м}; \quad (7)$$

– для днища

$$W_{дн} = \frac{J}{e} = 1531 \gg [631] \text{ см}^2 \cdot \text{м}. \quad (8)$$

При этом коэффициенты запасов по уровню нормальных напряжений не менее 1,10, а по уровню касательных напряжений – 1,43. В последней оценке учитывались только площади сечений связей борта, скулы и продольной переборки, не потерявшие устойчивость. Таким образом, при полном весе судна 761 т условия предельной общей продольной прочности корпуса обеспечиваются.

Поперечная прочность

Проверка прочности рамного набора днищевого перекрытия должна быть выполнена на основе расчётов перекрытия как стержневой системы [5]. Наименьшей прочностью обладает днищевое перекрытие грузового танка в среднем районе. Расчетная нагрузка для перекрытия определена по формуле (4). Расчётные приведённые напряжения не должны превышать допускаемые: 160 МПа – для флоров, 132 МПа – для днищевых стрингеров.

Расчёты прочности днища на указанную нагрузку выполнены методом конечных элементов (МКЭ) при весе судна 716 т и полном осушении для конструкции в построечном варианте. Расчётная нагрузка грунта прикладывалась к продольным связям.

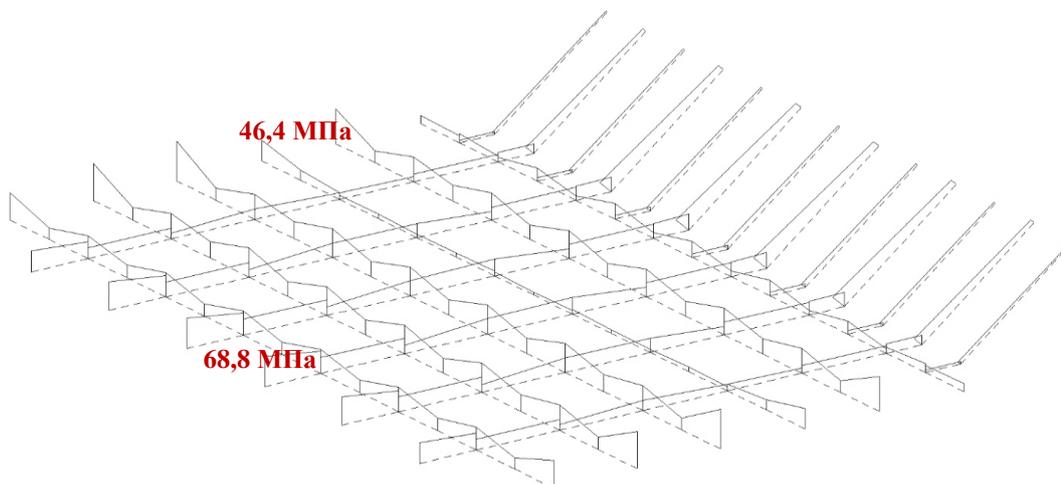


Рис. 3. Конструктивная схема отсека и расчётные приведённые напряжения

Расчёты показали, что наибольшие приведенные напряжения в стрингерах (46,4 МПа) и флорах (68,8 МПа) меньше допускаемых (рис. 3). Наибольшие касательные напряжения в стенках флоров 29,2 МПа определены без учета вырезов для прохода продольных днищевых балок (полособульб №10). С учетом этих вырезов касательные напряжения будут больше – 42,5 МПа. Высота выреза для полособульба №10 принята 110 мм. Эти напряжения более чем в 2 раза меньше допускаемых касательных 92,4 МПа. Расчеты показали, что такие вырезы можно не компенсировать заделками, учитывая и то, что они выполняют функции шпигатов для перетоков жидких грузов в танках. Таким образом, изгибная и сдвиговая прочность рамных связей днищевых перекрытий обеспечена с существенными запасами.

Местная прочность

Согласно Правилам [5], требуемая толщина наружной обшивки определяется по формуле

$$s = 15,8ak_{\alpha} \sqrt{\frac{k_p p}{k_{\sigma} R_{eH}}} \cdot m_n^{-1} \quad (9)$$

и не должна быть менее

$$s_{\min} = (5,5 + 0,04 \cdot L) \sqrt{\eta} = (5,5 + 0,04 \cdot 47,5) \sqrt{1} = 7,4 \text{ мм}, \quad (10)$$

где a – размер меньшей стороны пластины, м;
 k_{α} – коэффициент соотношения сторон пластины;
 p – расчётное давление грунта по формуле (1), кПа;
 k_{σ} – коэффициент допускаемых напряжений;
 m_n – коэффициент допускаемой остаточной толщины.

Пластины горизонтального кия, обшивки днища и скулы имеют отличия по размерам и системам набора. Поэтому требования к их толщинам должны определяться отдельно. Расчёты для трех типов пластин показали, что значения коэффициентов запаса по толщинам:

1,60 – для горизонтального кия;

1,01 – для обшивки скулы;

1,13 – для обшивки днища (где флоры установлены через 2 шпации).

Таким образом, по условиям прочности обшивки днища и скулы подкреплений не требуется.

Днище баржи в районе продольной системы набора и грузовых танков включает продольные балки одного профиля – полособульб №10. При этом 1-я и 5-я балки от ДП относительно более прочные, так как в середине пролета поддерживаются доковыми и скуловыми бракетами соответственно.

Скуловые бракеты также могут быть проверены как однопролетные балки со свободными опорами. Расчеты требуемых параметров сечений перечисленных балок по формулам Правил показали коэффициенты запасов по моменту сопротивления и по площади сечения стенки:

1,06 и 1,30 – для полособульба № 10;

5,65 и 1,40 – для скуловых бракет.

Таким образом, по изгибной и сдвиговой прочности продольные днищевые балки и скуловые бракеты удовлетворяют требованиям.

Прочность штевней

Прочность поперечных сечений форштевня также проверена на основании расчёта МКЭ криволинейной балки переменного сечения с опорами на палубе, платформе и поперечной переборке. КЭМ конструкции кия-форштевня в районе форпика нагружалась погонной треугольной нагрузкой с максимумом в районе опорного сечения у форпиковой переборки.

По результатам расчетов уровень наибольших напряжений в построечном варианте достигает 290 МПа (рис. 4 а) и значительно превышает допускаемый 160 МПа. Требуется усиление для условий NAABSA1.

Как отмечено выше, пятка ахтерштевня, перо руля и баллер на судне отсутствуют. По данным владельца, последние годы эксплуатации баржи проходили без них. Учитывая этот опыт, а также значительный возраст судна (44 года), восстановление указанных конструкций в текущем и последующих ремонтах не планировали.

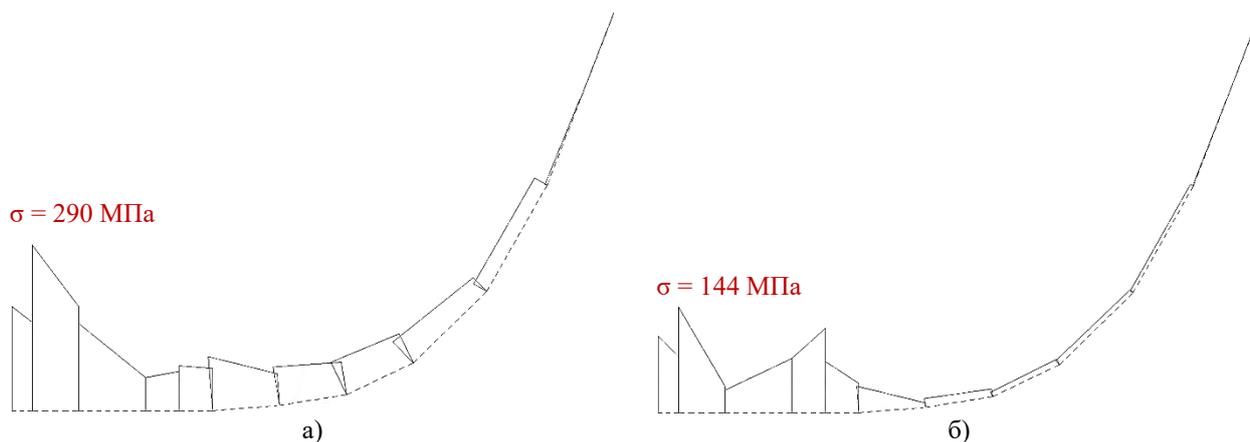


Рис. 4. Эпюры напряжений киль-форштевня в построечном варианте (а) и с усилением (б)

Схема усиления киль и анализ прочности

Для соответствия символу класса NAABSA1 и повышения прочности киль предложен вариант дополнительной опоры киль в районе 5–6-го шпангоутов. Это позволяет снизить уровень напряжений в 2 раза (рис. 4 б). Конструктивное решение по усилению киль дополнительной опорой (рис. 5) включает четыре детали из листовой стали обычной прочности толщиной 10 мм.

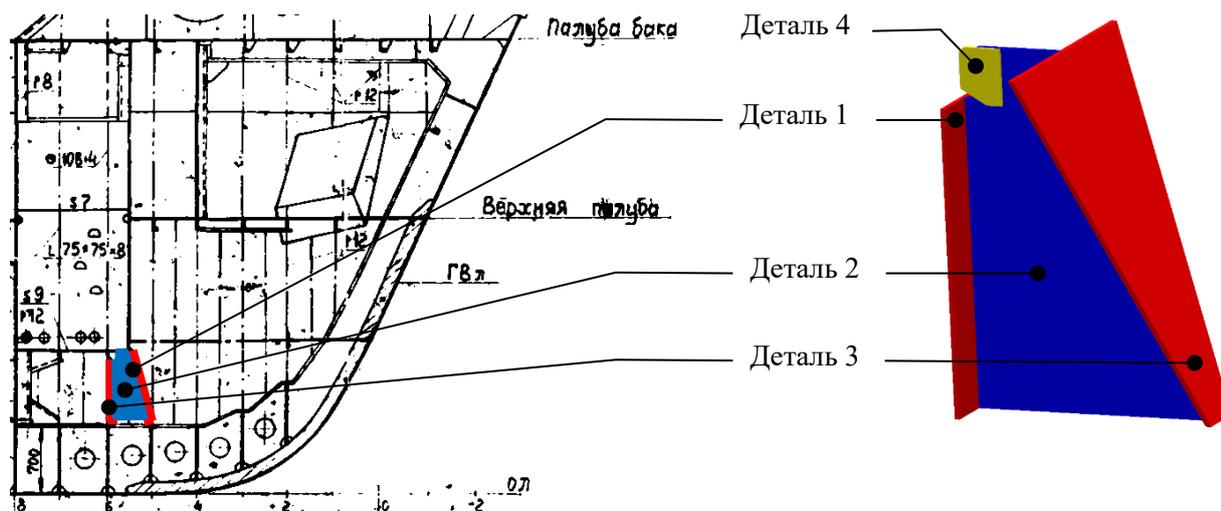


Рис. 5. Схема дополнительной опоры вертикального киль на стенки цепного ящика

Деталь 1: полка шириной 200 мм, устанавливаемая вертикально в плоскости 6-го шпангоута симметрично ДП.

Деталь 2: бракета трапециевидной формы с размерами нижней кромки 490 мм и верхней 200 мм, высотой до дна цепного ящика, устанавливается в плоскости вертикального киль.

Деталь 3: полка трапециевидной формы с размером нижней кромки 100 мм и верхней – 500 мм, устанавливаемая с наклоном вдоль носовой кромки бракеты.

Деталь 4: заделка выреза для прохода полосульба в левом верхнем углу бракеты.

Местная прочность такого решения проверена расчетами в программе SolidWorks при задании для всей конструкции материала обычной стали с верхним пределом текучести 235 МПа. Граничные условия задаются таким образом, чтобы для верхних кромок всех деталей запретить перемещения по всем направлениям, а нижние могут перемещаться только по вертикальному направлению. Расчетная нагрузка в виде давления составляет 123 МПа и прикладывается на нижние кромки деталей. Сетка разбивки модели на КЭ выполнена с учетом рекомендации

Правил DNV-GL (членов МАКО) о размерах сетки 50x50 мм для таких задач (рис. 6а), определены места наибольших напряжений опорной конструкции (рис. 6 б).

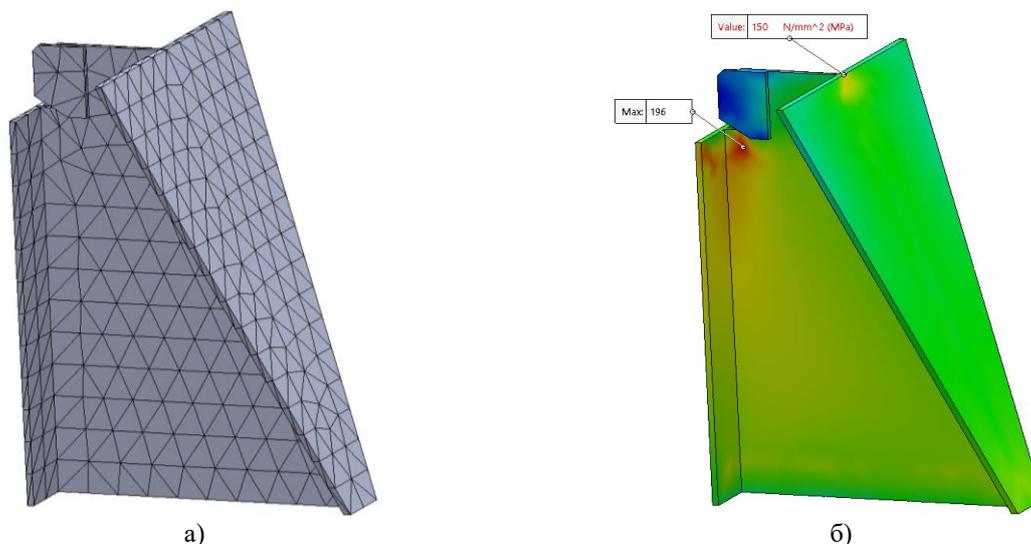


Рис. 6. Сетка разбивки на конечные элементы (а) и места наибольших напряжений (б)

По результатам расчетов напряжения в районе выреза и концентрации 196 МПа меньше напряжений текучести 235 МПа. В других местах наибольшие напряжения не более 150 МПа – меньше допускаемых 160 МПа. Решение удовлетворяет условиям прочности. Как вариант, вместо заделки можно причертить вырез в бракете для полособульба по месту и обварить.

Заключение

В работе приведены расчётные обоснования для соответствия корпуса судна символу класса Регистра NAABSA1. Показано, что требуется усиление кия в районе форпика. Предложен вариант усиления путем установки дополнительной опоры для кия в районе 5-6-го шпангоутов. Результаты работы приняты Регистром [4] и более детально изложены в [6].

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Азовцев А.И., Кулеш В.А. Опыт приведения судна к условиям класса NAABSA (посадка на грунт) // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 2, № 1(47). С. 69–76. DOI 10.37220/МИТ.2020.47.1.080
2. Герман А.П., Кулеш В.А., Фам Ч.Х. Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова. 2020. Т. 12, № 5. С. 915–925.
3. МНБ-500-002. URL: <https://fleetphoto.ru/vessel/44105/> (дата обращения 15.04.2023).
4. Письмо Главного управления Регистра № 314–37–51048 от 13.03.2023.
5. Правила классификации и постройки морских судов. РМРС. Ч. 17, раздел 15 // Требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA). Санкт-Петербург, 2023. С. 258–269.
6. Кулеш В.А., Суков О.Э., Фам Ч.Х. Проверка соответствия корпуса несамоходной наливной баржи «МНБ-500-002» символу класса Регистра NAABSA1, ООО «МТИТ». Владивосток, 2023. 88 с.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/36-43>

Kulesh V., Surov O., Pham Trung Hiep

VICTOR A. KULESH, Doctor of Engineering Sciences, Professor, vkulesh@mail.ru

OLEG E. SUROV, Candidate of Engineering Sciences, Professor, surov.oye@dvfu.ru

PHAM TRUNG HIEP, Postgraduate Student, phiepast07@gmail.com

Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Analysis and reinforcement of a tanker barge for NAABSA1 class conditions

Abstract. The paper considers the issues of general longitudinal, transverse and local strength of the non-self-propelled tanker barge hull of 500 tons deadweight from the standpoint of interaction with the ground during drainage. The work was done to substantiate the conditions for compliance with the Register class symbol NAABSA1. The need to strengthen the keel in the forepeak area is shown. A simple scheme for strengthening the keel is proposed. The implementation of the proposed scheme ensures the safe operation of the vessel under NAABSA1 conditions with landings on the ground and drainage.

Keywords: tanker barge, landing on the ground, drainage, strength, keel reinforcement

For citation: Kulesh V., Surov O., Pham Trung Hiep. Analysis and reinforcement of a tanker barge for NAABSA1 class conditions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(2):36-43. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Azovsev A.I., Kulesh V.A. Adaptation experience of ship to the class NAABSA (safely aground). *Marine Intellectual Technologies*. 2020;2(1):69-76. (In Russ.). DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.080
2. German A.P., Kulesh V.A., Pham Trung Hiep. Strengthening of the vessel for cargo operations aground. *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2020;12(5):915–925. (In Russ.).
3. MNB-500-002. URL: <https://fleetphoto.ru/vessel/44105/> – 04.15.2023.
4. Letter of Russian Maritime Register of Shipping No. 314-37-51048 (March 13, 2023).
5. Rules for the Classification and Shipbuilding. RMRS. Part XVII. Ch. 15. *Requirement for vessels operating on the ground (NAABSA vessels)*. St. Petersburg, 2023. P. 258–268.
6. Kulesh V.A., Surov O.E., Pham Trung Hiep. Compliance verification of the non-self-propelled tanker barge hull “MNB-500-002” with the Register class NAABSA1, OOO “MTIT”. Vladivostok, 2023. 88 p.