

Проектирование и конструкции судов

Научная статья
УДК 629.5.081.32
DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/22-34>

С.В. Антоненко, В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, М.В. Китаев, А.И. Мамонтов,
А.А. Муратов, В.В. Новиков, Л.И. Чехранова

АНТОНЕНКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – д.т.н., профессор, профессор департамента,
sergey.antonenko.43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8127-4625>

БУГАЕВ ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, профессор департамента,
bugaev.vg@dvfu.ru

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент департамента, maxkit@mail.ru

МАМОНТОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент департамента, mamontov.ai@dvfu.ru

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент департамента, leka230243@gmail.com

ЧЕХРАНОВА ЛИДИЯ ИГОРЕВНА – к.т.н., доцент департамента, chekhranova.li@dvfu.ru

Департамент морской техники и транспорта Политехнического института

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

МУРАТОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ – руководитель группы

производственно-технического отдела, muratovaa@sskzvezda.ru

Судостроительный комплекс «Звезда»

г. Большой Камень, Россия

ДАМ ВАН ТУНГ – к.т.н., damvantung@mail.ru

Кафедра управления промышленной инженерией, факультет морской инженерии

Вьетнамский морской университет

Хайфон, Вьетнам

Исследование прочности батопорта сухого дока ССК «Звезда» как пространственной конструкции

Аннотация. В процессе проектирования и строительства сухого дока для судостроительного комплекса в г. Большой Камень у российских специалистов возникли расхождения с проектантами из КНР по вопросам обеспечения прочности батопорта. В результате анализа проектной документации были выявлены конструктивные недостатки, в частности «жесткие точки». К решению возникших вопросов были привлечены представители ДВФУ. В предыдущей статье авторов [7] были рассмотрены результаты оценки прочности батопорта при использовании простых инженерных методов. Кроме того, методом конечных элементов были выполнены расчеты устойчивости и вибрации типового узла в нижней части батопорта. Настоящая статья посвящена исследованию методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния батопорта в целом как сложной пространственной конструкции.
Ключевые слова: сухой док, батопорт, прочность, жесткие точки в конструкции

Для цитирования: Антоненко С.В., Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Китаев М.В., Мамонтов А.И., Муратов А.А., Новиков В.В., Чехранова Л.И. Исследование прочности батопорта сухого дока ССК «Звезда» как пространственной конструкции // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 3(56). С. 22–34.

Введение

На судостроительном комплексе «Звезда» в г. Большой Камень введен в строй сухой док [8]. Вход в него, имеющий ширину 114 м, закрывает изготовленный по китайскому проекту

© Антоненко С.В., Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Китаев М.В., Мамонтов А.И., Муратов А.А., Новиков В.В., Чехранова Л.И., 2023

Статья поступила: 13.02.2023; рецензирование: 22.08.2023.

батопорт нетрадиционной конструкции. При рассмотрении этого проекта у российских специалистов возникли сомнения в отношении прочности, связанные с наличием конструктивных недоработок. В статье [3] отмечаются некоторые результаты расчетного анализа прочности конструкции батопорта, выполненного специалистами ДВФУ. Исследование проведено как упрощенным методом, аналогичным изложенному в [13], так и с использованием конечно-элементного анализа. Цель работы – анализ надежности конструкции батопорта с учетом выявленных «жестких точек». Для рассмотрения затрагиваемых в статье вопросов в списке литературы приведены не только научные, но и другие касающиеся данной проблемы источники.

В статье анализируются результаты, полученные на полной конечно-элементной модели батопорта. Она сформирована в программном продукте трехмерного твердотельного моделирования SolidWorks. Программа позволяет также выполнять различные инженерные расчеты [1–5, 11]. Разработанная модель, в принципе, подобна той, которую использовали китайские проектанты. Была использована проектная документация [12], согласно которой приняты общие геометрические размеры батопорта (рис. 1) и оригинальная форма поперечного сечения в средней части (рис. 2). Для сравнения представлена модель, рассчитанная проектантом (рис. 3).

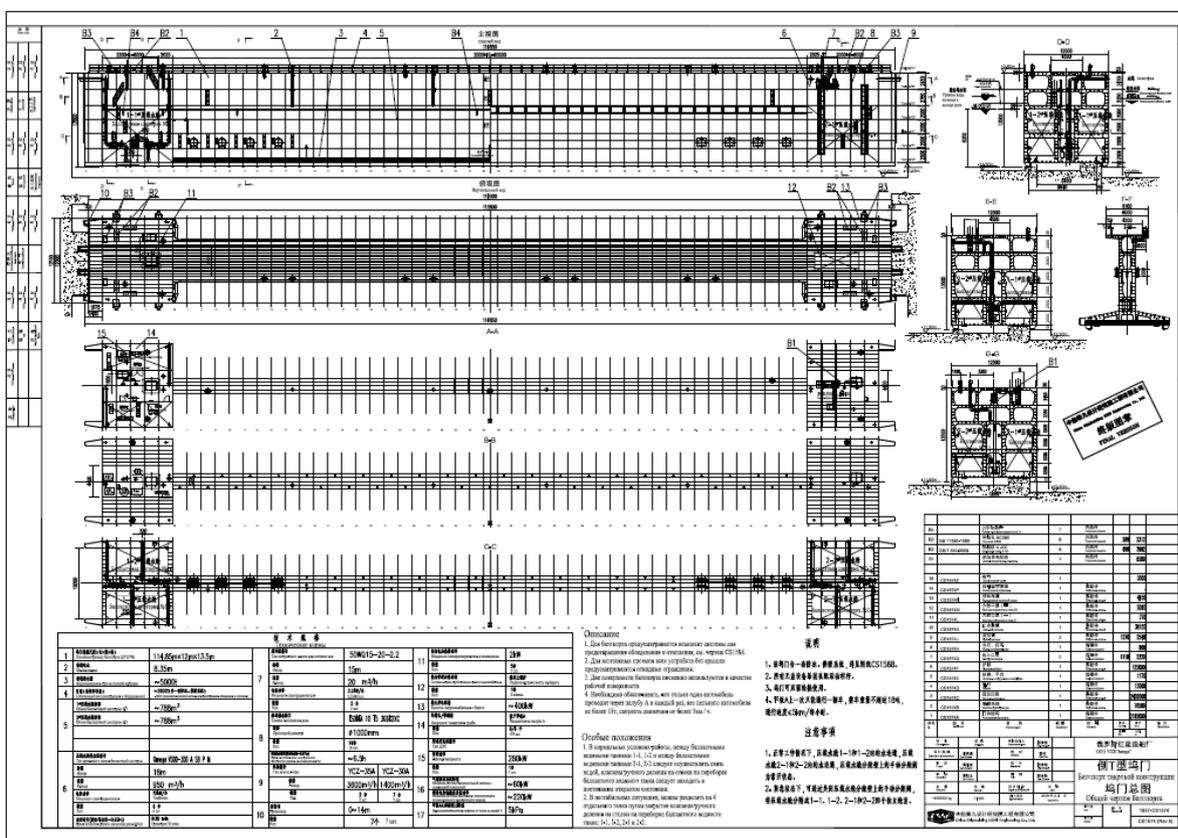


Рис. 1. Общий конструктивный чертеж батопорта

Размерность полной модели очень велика, и возможности доступной компьютерной техники не позволили выполнить ее расчет. Поэтому было принято решение произвести расчет прочности только центральной, более напряженной части батопорта (рис. 4). В связи с тем, что под действием эксплуатационных нагрузок батопорт испытывает преимущественно поперечный изгиб, а продольный изгиб влияет в основном на горизонтальные перемещения верхней палубы, можно надеяться, что полученные результаты определения напряжений достаточно адекватно отражают реальную картину. Предполагался также вариант стыковки концевой и центральной частей с расчетом каждой части отдельно, с приложением усилий их взаимодействия. Однако от него было решено отказаться из-за того, что основные проблемные

вопросы были связаны с наличием «жестких точек» в конструкции центральной части бато-порта [6, 9, 10].

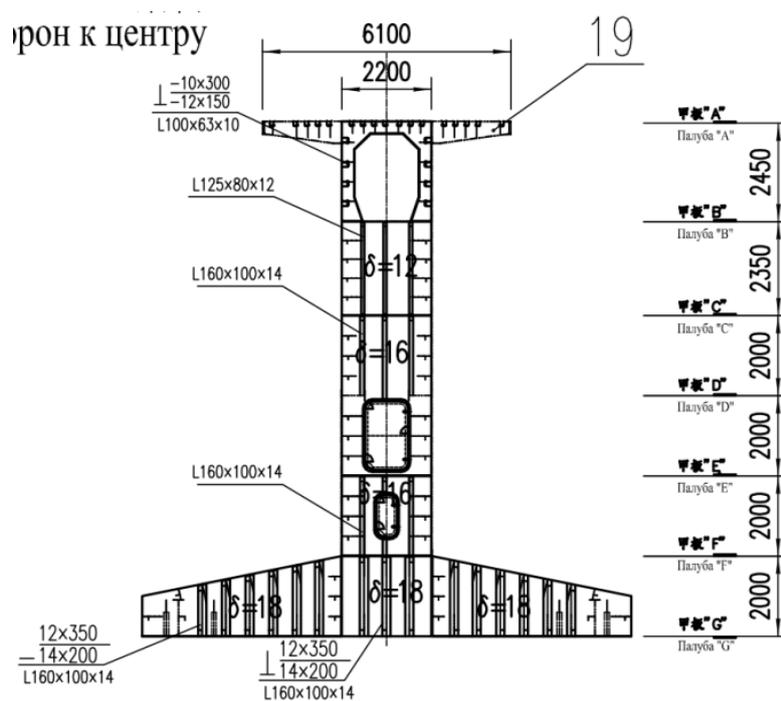


Рис. 2. Конструктивная схема поперечного сечения батопорта

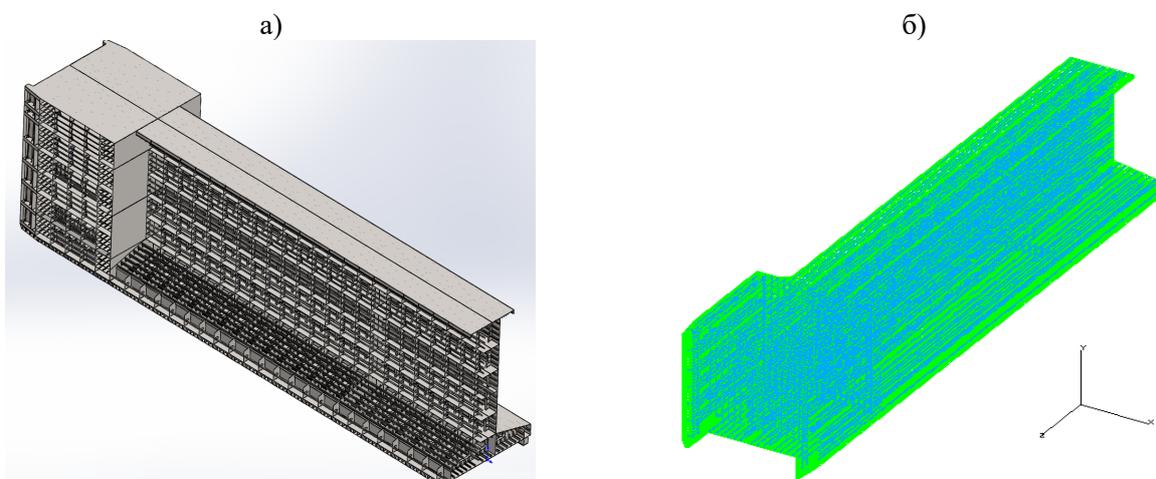


Рис. 3. 3D-модель батопорта:
а – разработанная ДВФУ (обшивка скрыта); б – разработанная проектантом

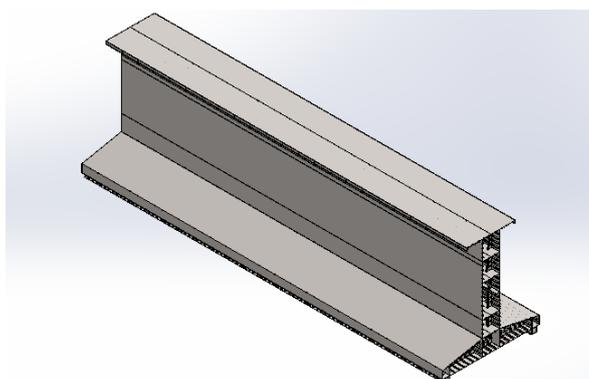


Рис. 4. 3D-модель центральной части батопорта

Приведенные допускаемые (по Мизесу) напряжения принимались такими же, как у проектанта, то есть 216 МПа. Были приняты варианты нагрузки, в целом соответствующие проектным.

Вариант 1: рассчитывался батопорт, опирающийся на устои дока, загруженный собственным весом (1300 т для половины батопорта, включая среднюю и концевые части), весом твердого балласта, равномерно распределенного по палубе G ($2400 / 2 = 1200$ т), ледовая нагрузка отсутствует. Уровень воды за бортом и гидростатическая нагрузка максимальные (рис. 5). Шпация поперечного набора = 2,0 м, мидель располагается между 28-й и 29-й шпациями.

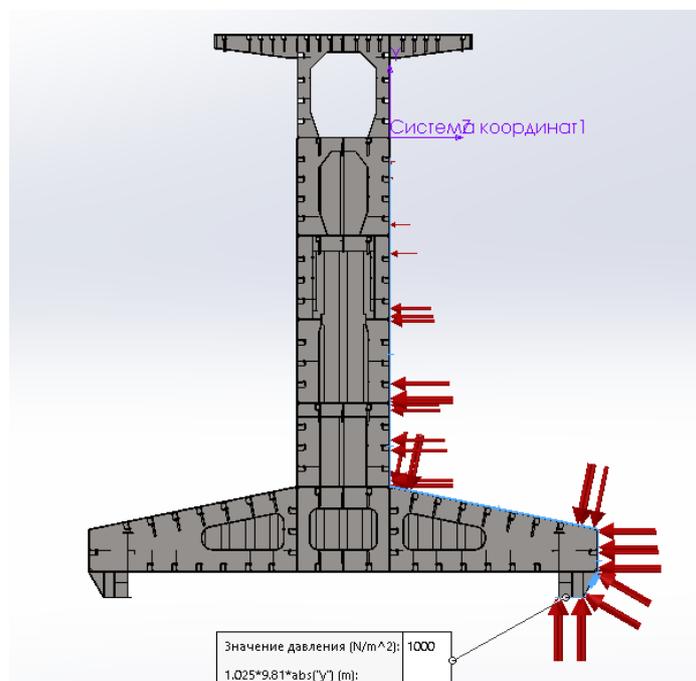
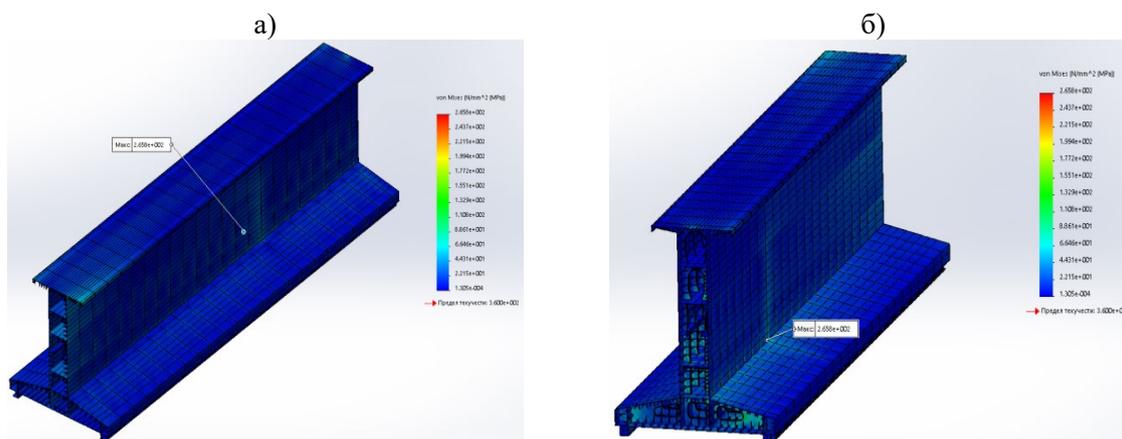


Рис. 5. Схема приложения гидростатической нагрузки



**Рис. 6. Распределение напряжений по Мизесу:
а – вид со стороны концевой части; б – вид со стороны мидель-шпангоута**

Максимальные напряжения, равные 265,8 МПа, возникают в районе поперечной переборки на шп. 21 (рис. 7). Это больше, чем допускаемые напряжения, принятые в проекте, но не превышают предел текучести – 355 МПа (составляет 75% предела текучести). Как можно видеть, область действия максимальных напряжений невелика. Отметим, что проектант не выделяет этот узел как опасный.

Распределение приведенных напряжений в районе «жестких точек» представлено на рис. 8, 9.



Рис. 7. Район поперечной переборки с максимальным напряжением:
а – общий вид со снятой обшивкой; б – наиболее напряженный узел

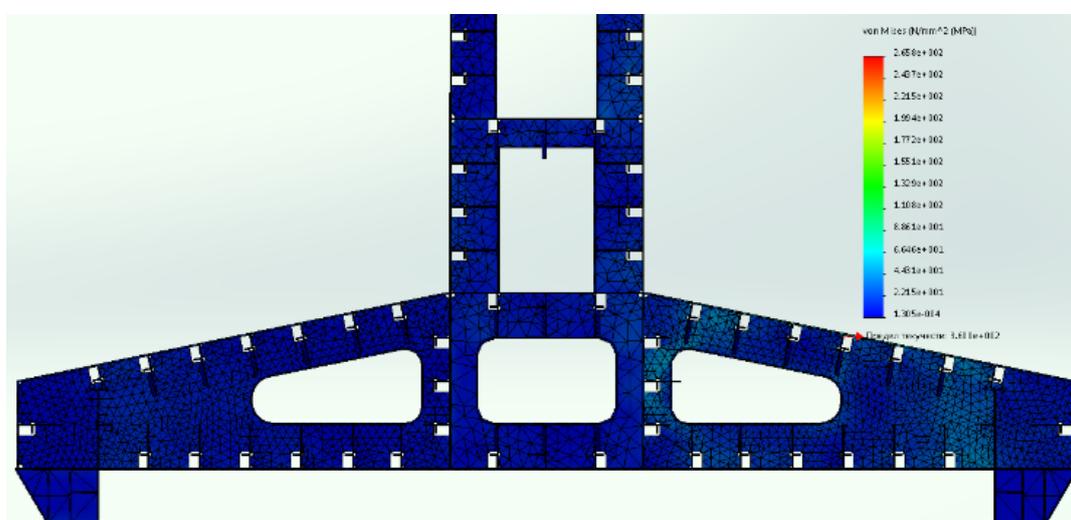


Рис. 8. Распределение напряжений в нижней части батопорта
(сечение по шп. 7)

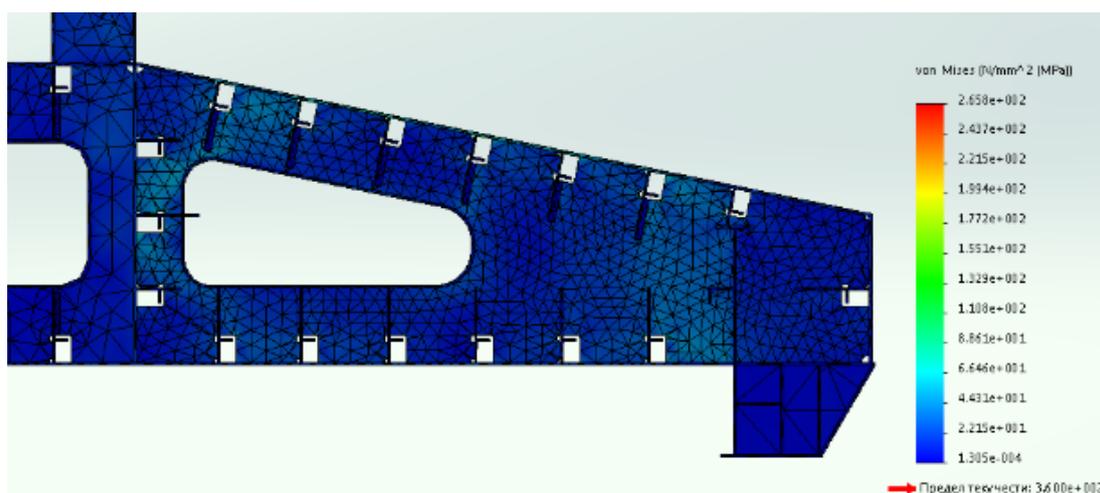


Рис. 9. Распределение напряжений в нижней части батопорта
(сечение по шп. 7, вид со стороны концевой части)

Можно заметить отсутствие явно выраженных пиков реакций в районе «жестких точек» у концов книц, поскольку внешние нагрузки действуют преимущественно в плоскости пластин (рис. 10, 11).

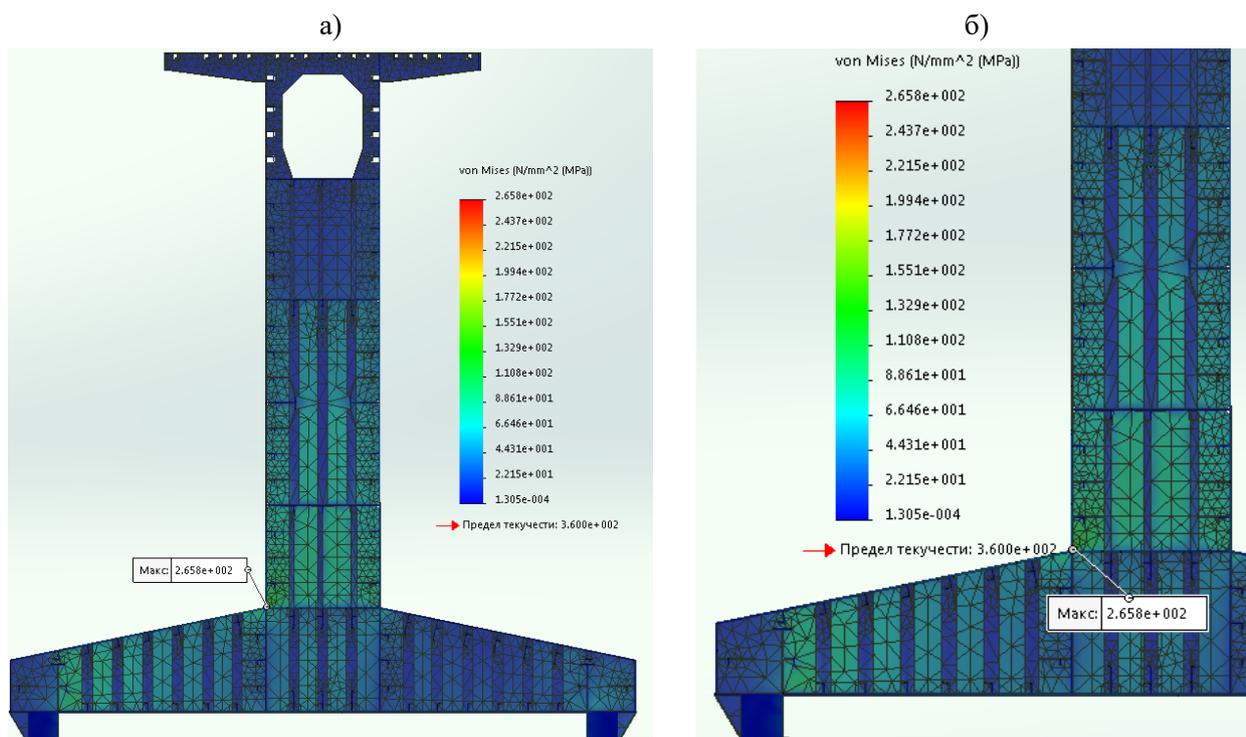


Рис. 10. Распределение напряжений в поперечной переборке, шп. 21:
а – вид со стороны миделя; б – вид со стороны концевой части

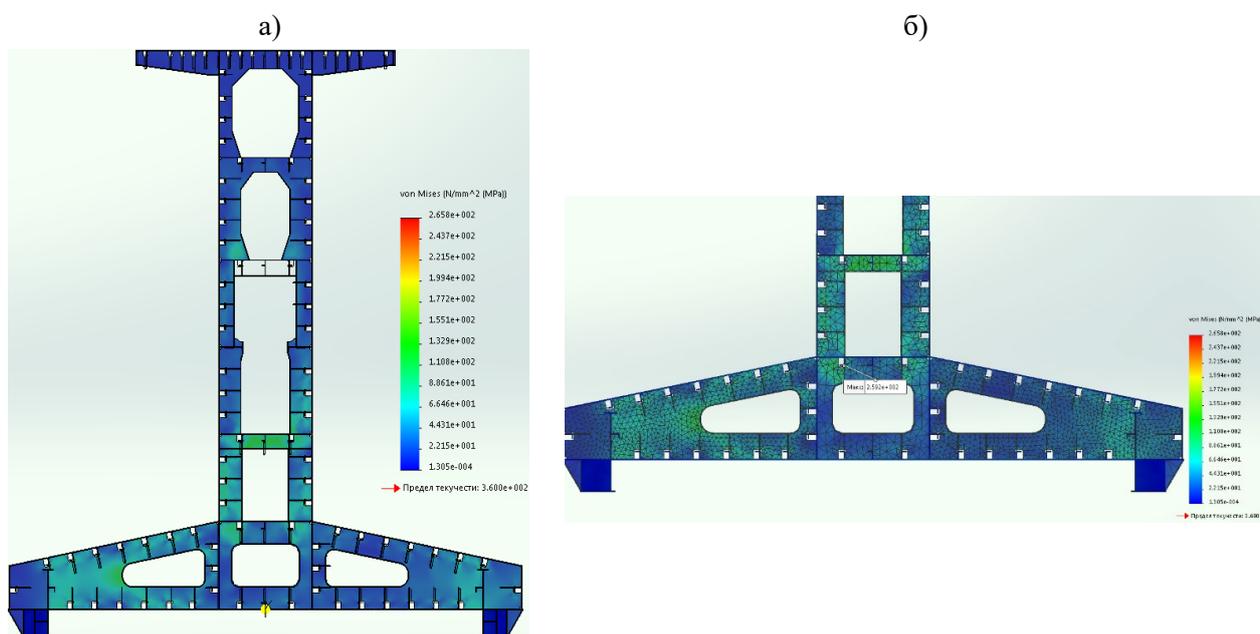


Рис. 11. Распределение напряжений в сечении по шп. 28:
а – вид со стороны миделя; б – вид со стороны концевой части палубы E – G

Для сравнения приведены картины напряжений (по Мизесу) в двух сечениях, в том числе по поперечной переборке, полученные расчетом проектанта (рис. 12, 13). Наибольшее напряжение, согласно расчету ДВФУ, составляет 266 МПа, у проектанта – 159 МПа, причем точки с наибольшими напряжениями располагаются в разных местах. Одна из возможных причин расхождения – неодинаковые размеры конечных элементов в районах действия высоких напряжений при больших градиентах.

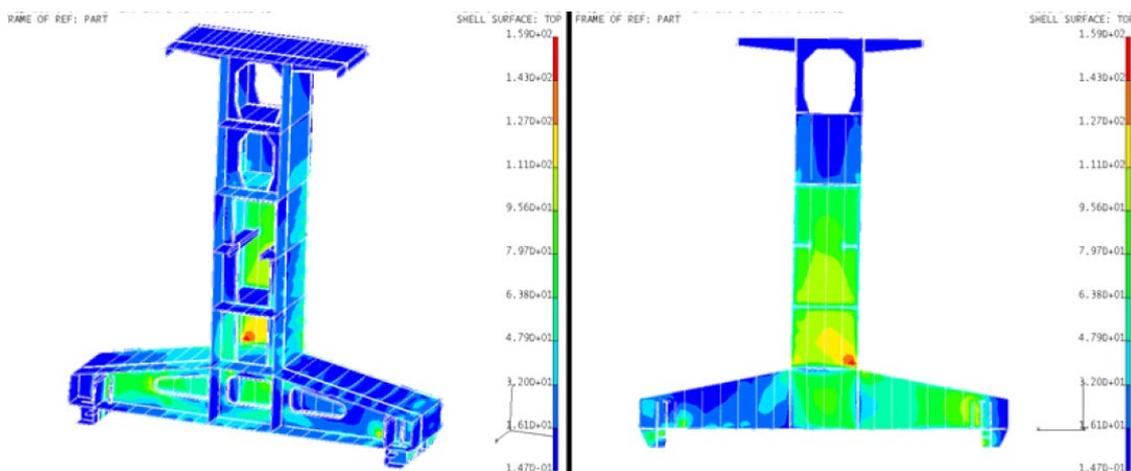


Рис. 12. Распределение приведенных напряжений по сечению (проектный расчет)

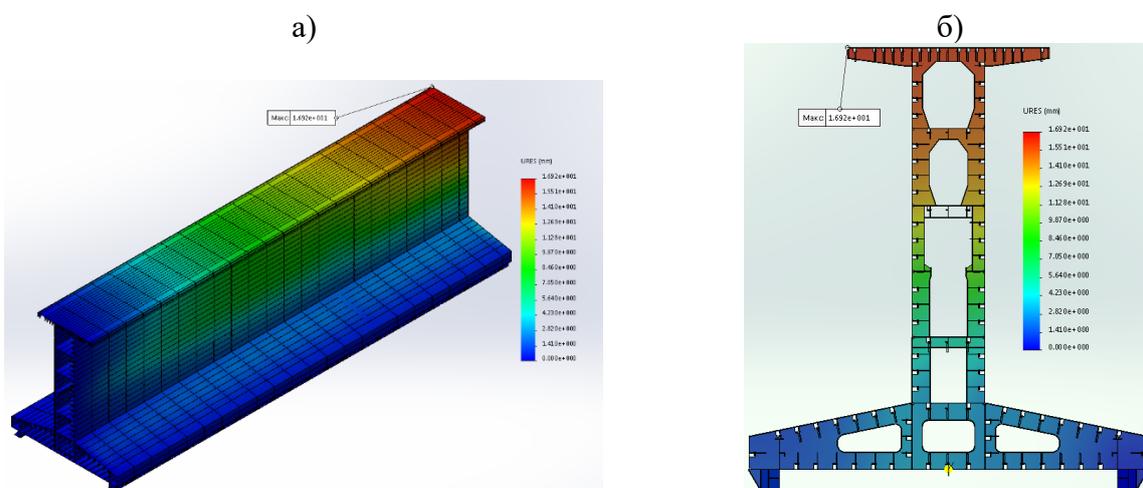


Рис. 13. Горизонтальные перемещения батопорта на шп. 28:
а – общий вид; б – вид со стороны концевой части

Наибольшее перемещение, как и следовало ожидать, получено на палубе А в районе мидель-шпангоута – 17 мм. Согласно проектному расчету, оно составило 25 мм (рис. 14). Но эта цифра соответствует полной длине батопорта, а не длине его центральной части.

Вариант 2: к нагрузкам от собственного веса и давления воды добавлена ледовая нагрузка интенсивностью 30 кН/м (3,06 т/м), приложенная по линии, что вполне соответствует расчету проектанта (расчетный режим 2).

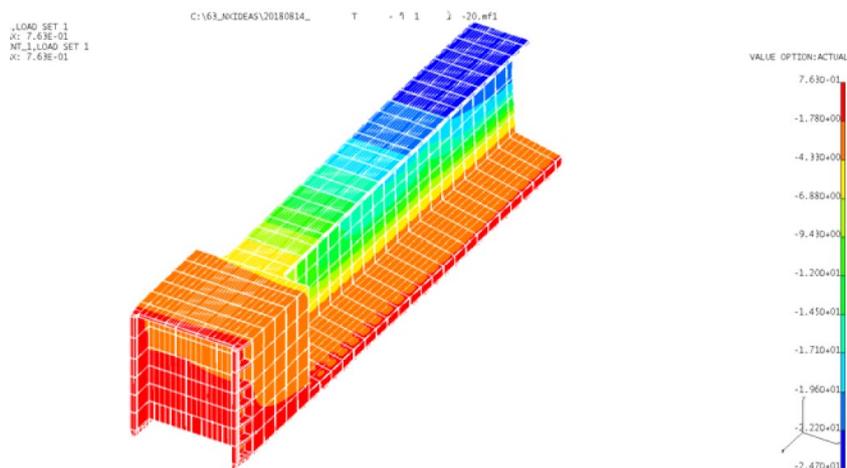


Рис. 14. Поле горизонтальных перемещений (по расчету проектанта)

Модель, как и прежде, считается жестко заделанной на концевой части, а на мидельшпангоуте учтены условия симметрии, о чем свидетельствуют схема приложения нагрузки и распределения напряжений в центральной части батопорта (рис. 15).

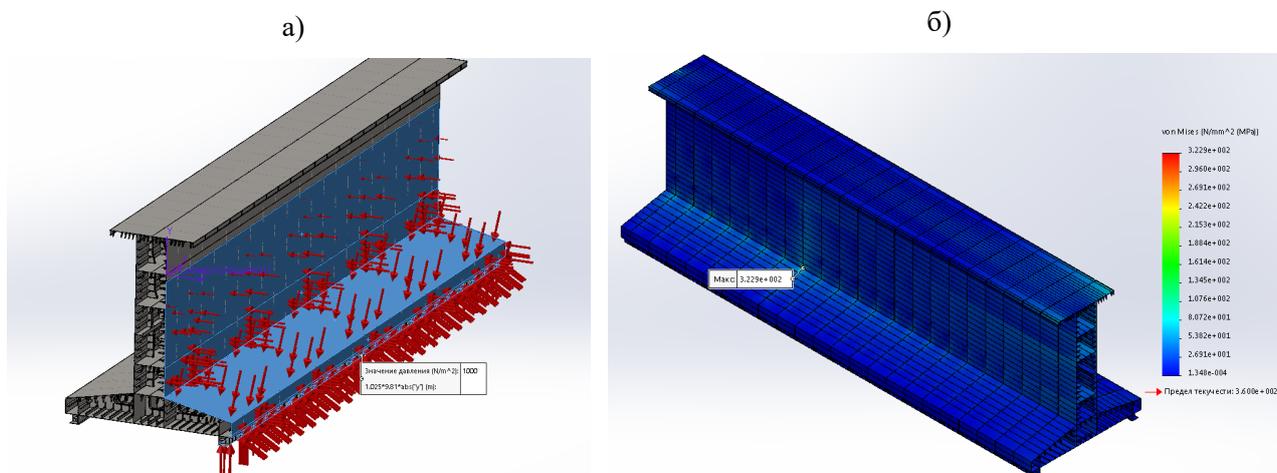


Рис. 15. Нагрузки и напряжения в батопорте:
а – схема приложения нагрузок; б – распределение напряжений

Согласно расчетам приведенных напряжений для этого варианта нагрузки (рис. 16–22) максимальные напряжения возникают в районе поперечной переборки на шп. 21 и составляют 322,9 МПа.

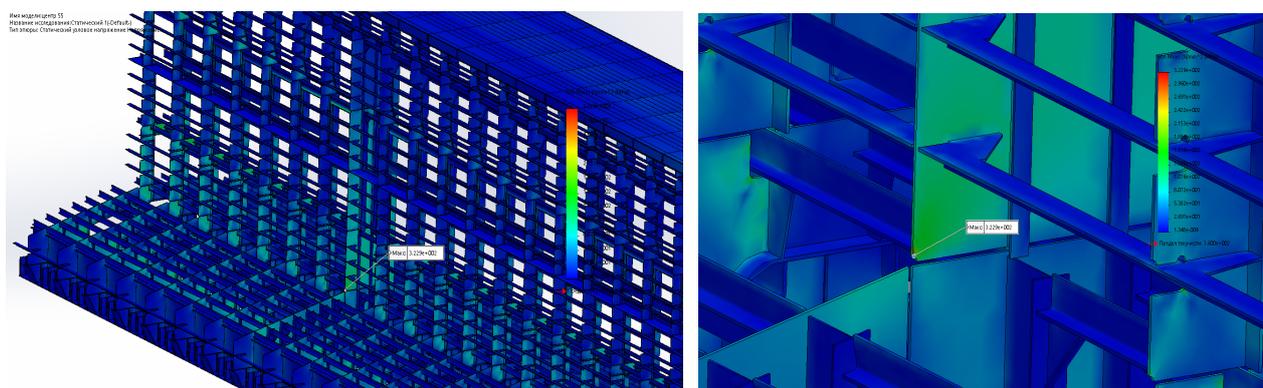


Рис. 16. Район поперечной переборки с максимальным напряжением

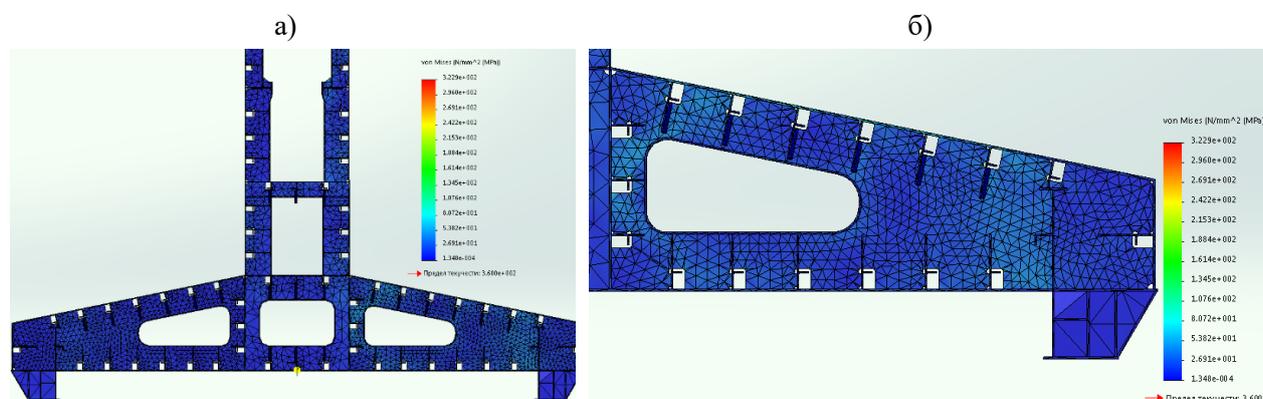


Рис. 17. Распределение напряжений в шп. 7
(в районе перехода в концевую часть):
а – напряжения в нижней части шпангоутной рамы; б – вид со стороны концевой части

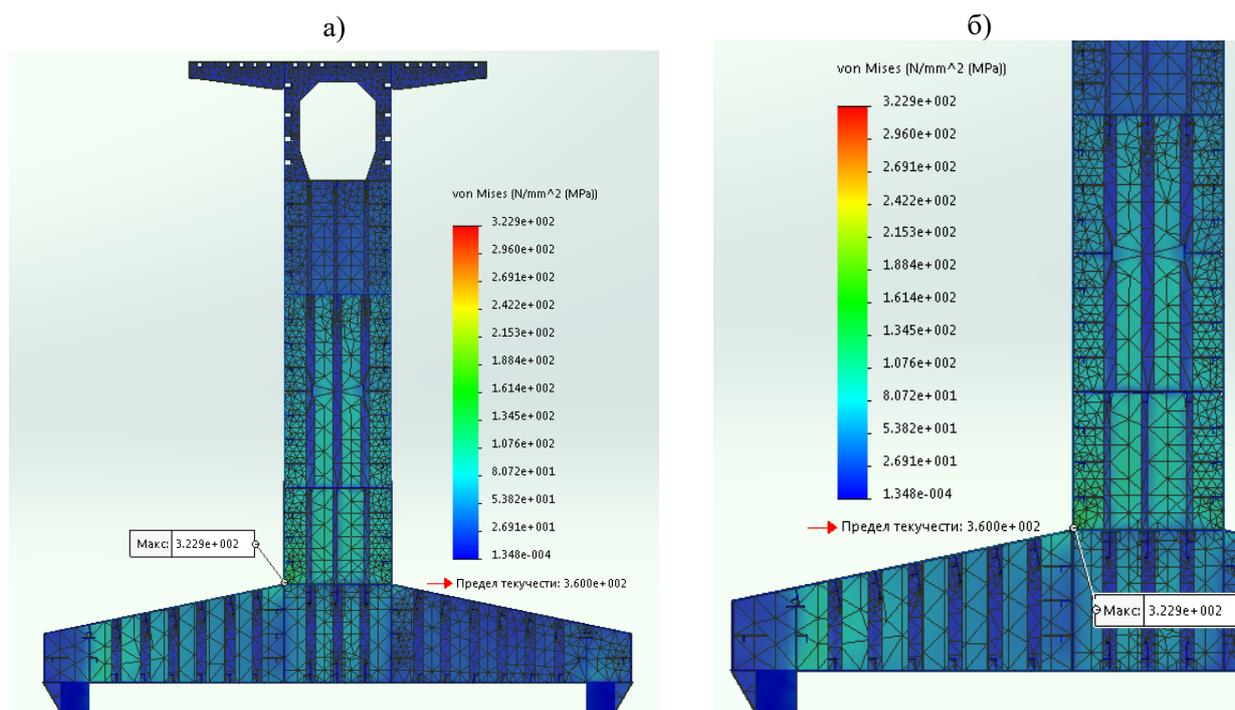


Рис. 18. Распределение напряжений в переборке на шп. 21:
а – напряжения в переборке; б – вид со стороны концевой части

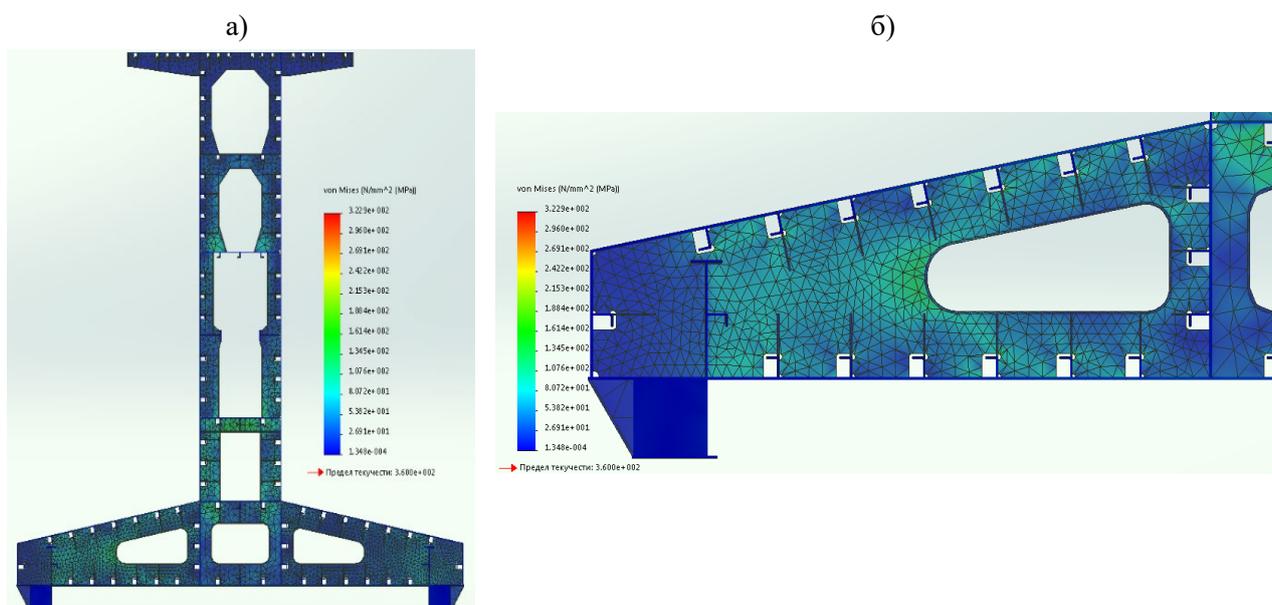


Рис. 19. Распределение напряжений в миделевом сечении (шп. 28):
а – общий вид; б – нижняя часть

Наибольшие напряжения для этого варианта нагрузки составили 323 МПа, или 91% от предела текучести, что заметно выше допускаемых. Место возникновения максимальных напряжений вновь совпадает с поперечной переборкой на уровне палубы F. Отметим, однако, что высокие напряжения локализованы на сравнительно небольших участках, о чем свидетельствует преобладание синего цвета на рисунках, показывающих распределение напряжений.

Для сравнения показаны распределение перемещений в поперечном направлении (рис. 21), а также напряжений в двух поперечных сечениях, полученное проектантом (рис. 20) и поле перемещений по проектному расчету (рис. 22).

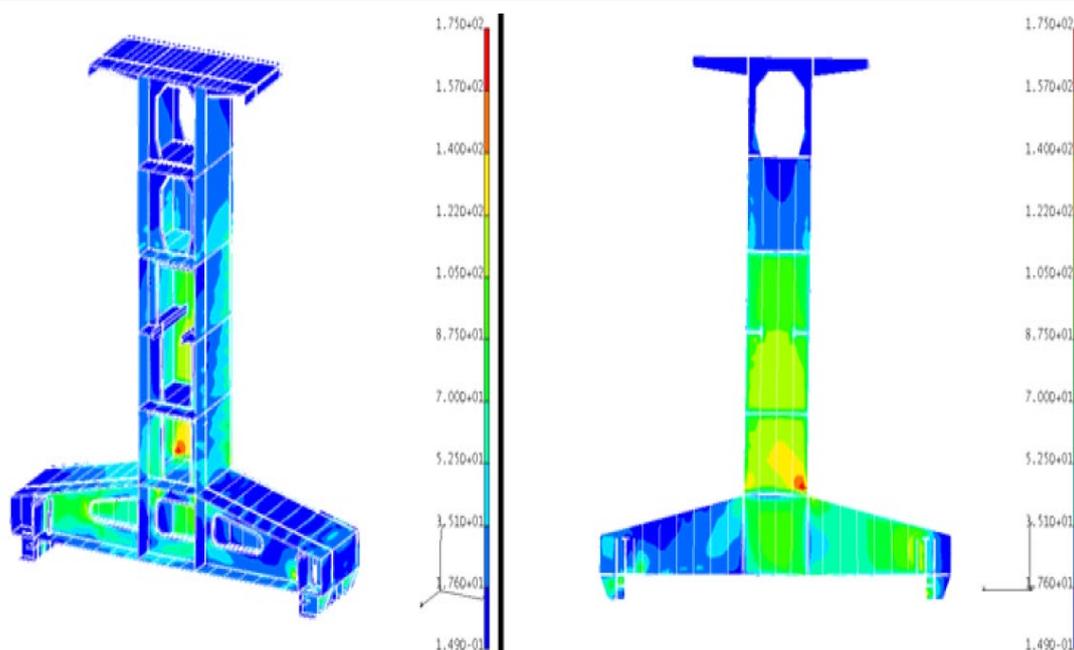


Рис. 20. Картина напряжений (по Мизесу) в поперечных сечениях батопорта (расчет проектанта, вариант нагрузки 2)

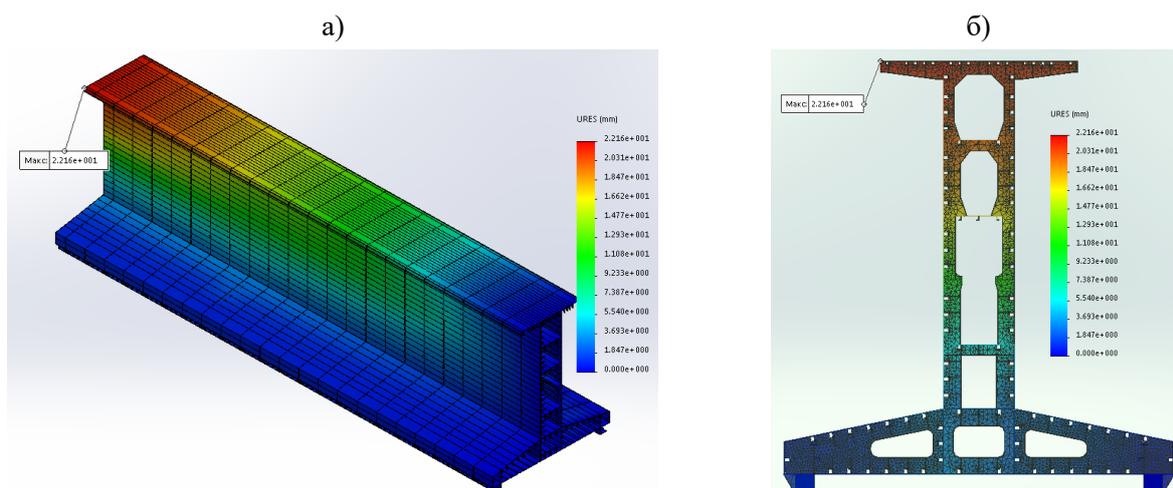


Рис. 21. Распределение поперечных перемещений: а – по длине батопорта; б – в миделевом сечении

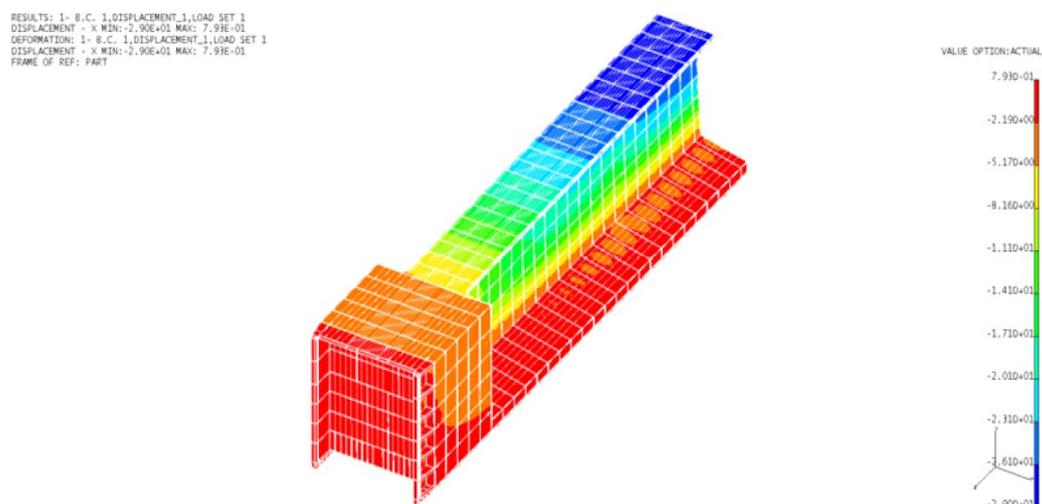


Рис. 22. Поле поперечных перемещений в варианте 2 (проектный расчет)

Наибольшие перемещения зафиксированы в палубе А в районе шп. 28. Они составили 22 мм. В проектном расчете наибольшие перемещения – 29 мм, что согласуется с указанной причиной расхождения.

В целом можно считать, что полученные нами результаты качественно близки к результатам проектанта. Однако имеются количественные расхождения, причем в наших расчетах наибольшие напряжения превышают допускаемые, особенно при учете проектных ледовых нагрузок. Причины расхождений могут быть выявлены при дальнейшем анализе.

Расчеты не подтвердили опасения российских специалистов относительно опасности «жестких точек». Более напряженным получается узел слома борта в средней части батопорта на уровне палубы F в сечении по поперечной переборке.

Как отмечалось ранее [7], опасность «жестких точек» (типа окончания кницы) на неподкрепленной пластине должна проявляться при изгибе пластины. В рассмотренных случаях пластины флоров работают на нагрузки, действующие в своей плоскости. Изгиб этих пластин может проявиться в трех случаях: 1) вибрация; 2) потеря устойчивости; 3) сварочные деформации (угловые). Последний фактор трудно учесть.

Общее заключение

Результаты выполненных нами расчетов напряженно-деформированного состояния батопорта в целом согласуются с проектными. Но определенные сомнения вызывает прочность узла пересечения поперечной переборки и палубы F, особенно при возможном воздействии со стороны ледяного поля.

«Жесткие точки», имеющиеся в конструкциях батопорта, являются конструктивными недоработками. Но в условиях эксплуатации их наличие, вероятно, не приведет к появлению трещин или другим нарушениям прочности. Опасность может представлять только повышенная вибрация конструкций в этих районах.

Высокие расчетные напряжения, превышающие допускаемую величину, полученные методом конечных элементов, по нашему мнению, обусловлены влиянием концентрации напряжений в узлах сопряжения элементов корпуса. Область высоких напряжений мала, а градиенты напряжений в ее пределах высоки. По нашему мнению, такое местное повышение напряжений не представляет угрозы для прочности батопорта. Следует также иметь в виду, что нормы допускаемых напряжений не увязаны с применяемыми методами расчетов, что, строго говоря, неверно. Как показано, при использовании традиционных инженерных моделей уровень расчетных напряжений меньше, чем по МКЭ.

Таким образом, можно сделать вывод, что проектная конструкция батопорта обладает достаточной прочностью при действии обычных эксплуатационных нагрузок. Тем не менее в процессе эксплуатации необходимо тщательно контролировать состояние батопорта, обращая особое внимание на узлы между днищем и палубой F (играющей роль второго дна), а также в районе этой палубы. Кроме того, следует, насколько это возможно, не допускать навалов на батопорт крупных льдин и буксира, особенно когда батопорт не находится на плаву, а установлен на опоры.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks. Москва: DMK Press, 2010. 784 с.
2. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. Москва: DMK Press, 2015. 562 с.
3. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2007. Наиболее полное руководство. Самоучитель. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. 1328 с.
4. Дударева Н., Загайко С. Самоучитель SolidWorks 2010. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

5. Зиновьев Д.В. Основы моделирования в SolidWorks: практическое руководство / под ред. М.И. Азанова. Москва: ДМК Пресс, 2017. 240 с.
6. Иванов Н.А., Новиков В.В. Некоторые вопросы проектирования судовых конструкций с жесткими точками // Регистр СССР. Ленинград: Транспорт. 1981. Вып. 10. С. 86–94.
7. Антоненко С.В., Бугаев В.Г., Дам Ван Тунг, Мамонтов А.И., Муратов А.А., Новиков В.В., Чехранова Л.И. Исследование прочности батопорта сухого дока ССК «Звезда» // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2023. № 2(55). С. 13–25.
8. На ССК «Звезда» завершено строительство крупнейшего в России судостроительного сухого дока. URL: <https://bmpd.livejournal.com/4452403.html?ysclid=lb4hys19o1564165229>
9. Барабанов Н.В., Иванов Н.А., Новиков В.В., Шемендюк Г.П. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1989. 256 с.
10. Приложения к методическим рекомендациям по техническому наблюдению за ремонтом морских судов. НД № 2-039901-005. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2020. 451 с.
11. Шам Тику. Эффективная работа: SolidWorks 2004. Санкт-Петербург: Питер, 2005. 768 с.
12. 01.NDRI-DG-001-Rev.04. Конструктивные чертежи батопорта. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd. 2018. 197 с.
13. Тряскин В.Н., Юй Синьянь. Постановка и решение задачи проектирования рамного набора поперечной водонепроницаемой переборки крупнотоннажного контейнеровоза с использованием оптимизационно-поисковых процедур и нормативных требований правил DNV-GL // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1, № 3(53). С. 49–53.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 3/56

Ship design and construction

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

DOI: <http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-3/22-34>

Antonenko S., Bugaev V., Dam Van Tung, Kitaev M., Mamontov A., Muratov A., Novikov V., Chekhranova L.

SERGEY V. ANTONENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor, sergey.antonenko.43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8127-4625>

VIKTOR V. BUGAEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, bugaev.vg@dvfu.ru

MAKSIM V. KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, maxkit@mail.ru

ANDREY I. MAMONTOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, mamontov.ai@dvfu.ru

VALERII V. NOVIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, leka230243@gmail.com

LIDIA I. CHEKHRANOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, chekhranova.li@dvfu.ru

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

ALEXANDR A. MURATOV, Team Leader of Production and Technical Department, muratovaa@sskzvezda.ru

Shipbuilding complex "Zvezda"

Bolshoi Kamen, Russia

DAM VAN TUNG, Candidate of Engineering Sciences, damvantung@mail.ru

Vietnam Maritime University

Haiphong, Vietnam

Investigation of the strength of the dry dock gate of the SSK Zvezda as a spatial structure

Abstract. During the design and construction of a dry dock for the shipbuilding complex in Bolshoy Kamen, Russian specialists had disagreements with designers from China on the issues of ensuring the strength of the

dock gate. As a result of the analysis of the project documentation, design flaws were identified, in particular, hard points. FEFU representatives were involved in solving the issues that arose.

In the previous article, the results of assessing the strength of the dock gate using simple engineering methods were considered. In addition, the finite element method was used to calculate the stability and vibration of a typical node in the lower part of the dock gate. This article is devoted to the study of the stress-strain state of the dock gate as a whole as a complex spatial structure by the finite element method.

Keywords: dry dock, dry dock gate, strength, rigid points in the structure

For citation: Antonenko S., Bugaev V., Dam Van Tung, Kitaev M., Mamontov A., Muratov A., Novikov V., Chekhranova L. Investigation of the strength of the dry dock gate of the SSK Zvezda as a spatial structure. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(3):22–34. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Alyamovskii A. COSMOSWorks. Fundamentals of strength analysis of structures in the SolidWorks environment. Moscow: DMK Press, 2010. 784 p. (In Russ.).
2. Alyamovskii A. SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations. Moscow: DMK Press, 2015. 562 p. (In Russ.).
3. Antonenko S., Bugaev V., Dam Van Tung, Mamontov A., Muratov A., Novikov V., Chekhranova L. Investigation of the strength of the dry dock gate of the SSK Zvezda. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(2/55):13–25. (In Russ.).
4. Dudareva N., Zagaiko S. SolidWorks 2007. The most complete guide. Tutorial. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. 1328 p. (In Russ.).
5. Dudareva N., Zagaiko S. SolidWorks 2010 Tutorial. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2011, 416 p.
6. Zinovyyev D. Fundamentals of modeling in SolidWorks. Practical guide. Moscow: DMK Press, 2017. 240 p.
7. Ivanov N., Novikov V. Some aspects of the design of ship structures with rigid points. *Scientific and technical collection. Register of the USSR*. Leningrad, 1981;(10):86–94. (In Russ.).
8. Construction of the largest shipbuilding dry dock in Russia has been completed at SSK Zvezda. Livejournal. (In Russ.). URL: <https://bmpd.livejournal.com/4452403.html?ysclid=lb4hys19o1564165-229> – 21.12.2021.
9. Barabanov N., Ivanov N., Novikov V., Shemendyuk G. Damage, and ways to improve ship structures. Leningrad, Shipbuilding. 1989. 256 p. (In Russ.).
10. Applications to methodological recommendations for technical supervision during the repair of sea-going vessels. ND 2-039901-005. Saint Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 451 p. (In Russ.).
11. Sham Tiku. Efficient work: SolidWorks. Saint-Petersburg: Piter. 2005. 768 p.
12. 01.NDRI-DG-001-Rev.04. Structural drawings of the dry dock gate. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd. 2018. 197 p. (In Russ.).
13. Tryaskin V.N., Yu Xinyan. Statement and solution of the problem of designing a frame set of a transverse watertight bulkhead of a large-capacity container ship using optimization and search procedures and regulatory requirements of the DNV-GL rules. *Marine Intelligent Technologies*. 2021;1(3):49–53. (In Russ.).