Проектирование и конструкции судов

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-6>
УДК 629.5.023

Л.И. Чехранова, А.П. Герман, Я.Р. Домашевская

ЧЕХРАНОВА ЛИДИЯ ИГОРЕВНА – к.т.н., доцент, SPIN: 3643-5534,
e-mail: li-chehr@mail.ru

ГЕРМАН АНДРЕЙ ПЕТРОВИЧ – доцент, SPIN: 3840-7584; ResearcherID: D-1725-2014,
ORCID: 0000-0002-9530-5258, ScopusID: 56417290300, e-mail: gerand1@yandex.ru

ДОМАШЕВСКАЯ ЯНА РУСЛАНОВНА – аспирант, e-mail: 100-70-100dom@mail.ru

Кафедра кораблестроения и океанотехники Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Конструктивное оформление стойки фальшборта: влияние на её податливость сдвигающего усилия

Аннотация: Чтобы избежать частых повреждений фальшбортов на построенных в разных странах судах с различными вариантами конструктивного оформления, необходим системный анализ взаимосвязи принимаемых решений на различных этапах жизненного цикла судна. Авторы данной статьи представляют модельный эксперимент, позволяющий получить форму упругой линии стойки фальшборта при действии сдвигающего усилия. Выявлено влияние варьирования размеров стойки, допускаемого нормативными документами, на податливость фальшборта в продольном направлении. Построена серия графиков, характеризующих податливость в зависимости от его конструктивного оформления. Результаты данной работы можно использовать при проектировании и эксплуатации судов.

Ключевые слова: стойка фальшборта, податливость фальшборта, коэффициент жёсткости, система фальшборт–корпус судна, упругая линия.

Введение

На различных этапах жизненного цикла судна необходимо проводить системный анализ взаимосвязи принимаемых решений [7], чтобы избежать частых повреждений фальшбортов. Нормативные документы рекомендуют фальшборт, отсоединенный от надстроек, присоединять к палубе стойками с фланцами, срезанными «на ус» и расширяющимися у палубы в виде книц. Последние увеличивают прочность крепления стоек фальшборта к палубе, но часто повреждаются. Считается, что сплошная прорезь фальшборта вместе с подвижными соединениями исключает его из работы при общем изгибе. По концам такие фальшборты отсоединяют от надстроек подвижными соединениями [4]. Однако полученные нами ранее результаты (см., например, eLIBRARY ID: 18148645 и DOI: 10.5281/zenodo.2578687) свидетельствуют о том, что фальшборты протяженностью между подвижными соединениями порядка 10 м, хотя и частично, но всё же участвуют в общем изгибе судна.

Решение задачи проектирования подвижных соединений в фальшборте связано с оценкой его податливости в продольном направлении. При определении податливости приходится сталкиваться со значительными трудностями из-за недостаточной изученности особенностей участия фальшборта в составе корпуса.

Учёт конструктивного оформления стоек при определении величины усилий, возникающих при частичном привлечении фальшборта к общему продольному изгибу, в технической литературе производится по-разному. В частности, А.И. Юшиным введён коэффициент жёсткости шва, а И.А. Притыкиным – коэффициент относительной приведенной жесткости стойки [5]. В нормативном документе [6] для учета конструктивного оформления стойки при определении усилий, возникающих в результате привлечения фальшборта к общему продольному изгибу судна, принята обобщающая характеристика податливости стоек.

До настоящего времени практически не изучено влияние конструктивного оформления стоек фальшборта у палубы и их поведение при действии сдвигающих усилий. Недостаточная изученность данного вопроса препятствует правильному конструктивному оформлению стоек, что провоцирует появление трещин у их основания [2].

Цель настоящей работы: с помощью модельного эксперимента исследовать влияние конструктивного оформления стойки фальшборта на её податливость при действии сдвигающих усилий.

Прежде всего нам необходимо:

- 1) изучить влияние ширины прорези в фальшборте и наличия ближайшего к борту наружного пояса на величину перемещения стойки при сдвиге;
- 2) оценить влияние напряжений в элементах системы фальшборт–корпус судна на величину общего сдвига стойки фальшборта и на определение коэффициента жёсткости.

Полный факторный эксперимент:

определение коэффициента жёсткости системы фальшборт–корпус судна

Сложность задачи определения коэффициента жёсткости k^* системы фальшборт–корпус судна и недостаточность учёта особенностей конструктивного оформления стоек обусловили проведение модельного эксперимента [1], который позволил выяснить влияние конструктивного оформления стойки на её податливость в продольном направлении при действии на фальшборт сдвигающего усилия. Для выявления этого влияния мы использовали математический метод планирования эксперимента [3]. Эксперимент проводился в 2018 г. в лаборатории кафедры кораблестроения и океанотехники Инженерной школы ДВФУ.

Первый этап эксперимента: моделирование воздействия ширины прорези между ширестреком и обшивкой фальшборта на податливость стойки. Мы создали две базовые модели, изготовленные из органического стекла и геометрически подобные фальшборту реального судна, спроектированному согласно нормативным документам. Модуль подобия размеров моделей 4,5. Модели различались шириной прорези фальшборта: в одном варианте ее ширина в пересчёте на натуру соответствовала 230 мм (наибольшая – по [4]), в другом – 120 мм (наименьшая – по [4]). У базовых моделей стойки были выполнены усиленными (рис. 1).

Рис. 1. Базовая модель фальшборта.
Здесь и далее – иллюстрации авторов.

Крепление моделей при испытаниях осуществлялось с помощью струбцин. Перемещение стоек и настила палубы, возникающие при действии сдвигающего усилия, замерялись индикаторами часового типа (рис. 2). После проведения экспериментов с базовыми моделями пояски усиленных стоек были срезаны «на ус» и выполнена вторая серия испытаний.

Рис. 2. Схема приложения сдвигающего усилия.

Таким образом, во время модельных испытаний варьировались ширина прорези между ширстреком и обшивкой фальшборта, а также момент сопротивления стойки у основания.

В данном случае рассматривалось двухмерное факторное пространство с границами

$$2,9 \leq k_1 \leq 4,4, \text{ см},$$

$$0,4 \leq k_2 \leq 2,1, \text{ см}^3,$$

где k_1 – коэффициент жёсткости фальшборта; k_2 – коэффициент жёсткости корпуса судна.

Отклики представляли собой перемещение стойки при действии на фальшборт сдвигающего усилия.

Общее число опытов N определялось всеми возможными неповторяющимися комбинациями уровней p факторов k по формуле

$$N = p^k = 2^2 = 4. \quad (1)$$

Вся квадратная таблица, содержащая 2^2 строк и столбцов, соответствующих условиям опытов для двух факторов, представляла собой матрицу планирования X , которая в статье не приводится.

Для построения математической модели связи между измеряемой величиной отклика и контролируемыми переменными факторами использовалась схема регрессионного анализа модели. Уравнения регрессии использовались для приближения к такому сочетанию указанных факторов, которое обеспечивало бы максимальную податливость фальшборта в продольном направлении.

Методом полного факторного эксперимента в кодированных переменных получена адекватная модель исследуемого объекта, состоящая только из значимых факторов

$$\hat{y} = 0,2488 + 0,0763x_1, \quad (2)$$

где x_1 – кодированная переменная, соответствующая k_1 .

Таким образом, удалось получить модель, адекватно оценивающую эффект воздействия ширины прорези между ширстреком и обшивкой фальшборта на податливость стойки при действии сдвигающего усилия.

После проведения двух серий испытаний исследовалось влияние наличия наружного пояска стойки (ближайшего к борту) на величину податливости фальшбортов в продольном направлении.

Результаты и обсуждение первого этапа

Анализ результатов испытаний показал следующее.

1. Величина $\frac{1}{k_1}$ значительно меньше, чем величина $\frac{1}{k_3}$, т.е. перемещения относительно палубы судна участка стойки между настилом палубы и нижней кромкой прорези фальшборта будут определяющими. Следовательно, при определении коэффициента жёсткости k^* системы фальшборт–корпус жёсткость самого фальшборта можно не учитывать. Погрешность, возникающая вследствие такого допущения, не превосходит принятых в инженерной практике величин.

2. С увеличением ширины прорези со 150 до 230 мм для стоек, у которых пояски срезаны «на ус», податливость фальшборта в продольном направлении увеличивается в 2,5 раза (рис. 3).

Рис. 3. Влияние ширины прорези на величину перемещения при сдвиге, ширина прорези: — 44 мм, ---- 33 мм.

3. Подкрепление наружной кромки стойки (у борта) пояском таких же размеров, как и наружный поясок, снижает податливость стойки в продольном направлении в 2,5–3 раза (рис. 4).

Рис. 4. Влияние наличия наружного пояска, ближайшего к борту, на величину перемещения стойки при сдвиге:

а – для стойки, имеющей наружный поясок; б – для стойки без наружного пояска.

Таким образом, с помощью модельного эксперимента были определены:

- 1) форма упругой линии стойки при действии на фальшборт сдвигающего усилия;
- 2) влияние допускаемого нормативными документами диапазона варьирования размеров стойки на податливость фальшборта в продольном направлении [4, 6].

Второй этап эксперимента: определение коэффициента жёсткости

На этом этапе определения коэффициента жёсткости нами использована балочная идеализация участка стойки, расположенного между настилом палубы и нижней кромкой обшивки фальшборта. Идеализация части стойки в виде балки постоянного сечения недостаточно точно отражает особенности конструктивного оформления фальшборта.

Коэффициент жёсткости системы фальшборт–корпус судна – это коэффициент пропорциональности между величиной сдвигающего усилия q_x и величиной сдвига δ_x . Сдвиг фальшборта происходит в результате напряжений, которые появляются как в самом фальшборте, так и в смежных с ним частях корпуса, а также в соединяющем шве. В общем виде сдвиг можно представить как

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (3)$$

где δ_1 – сдвиг от напряжений, действующих в фальшборте;
 δ_2 – сдвиг от напряжений, действующих в корпусе судна;
 δ_3 – сдвиг в шве, соединяющем фальшборт с корпусом судна.
 Коэффициент жёсткости системы фальшборт–корпус судна:

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}}. \quad (4)$$

Обозначив податливость, как $c_i = \frac{1}{k_i}$, получим формулу (4) в виде

$$k^* = \frac{1}{c_1 + c_2 + c_3}. \quad (5)$$

Предлагаемая идеализация части стойки (в виде балки переменного сечения), расположенной между настилом палубы и нижней кромкой обшивки фальшборта, основана на том, что по высоте стойка имеет различную податливость в продольном направлении. На первом участке стойка имеет постоянный момент инерции поперечного сечения I_0 , равный моменту инерции площади ее поперечного сечения у основания относительно оси, перпендикулярной ДП (диаметральная плоскость). На втором участке – постоянный момент инерции поперечного сечения стойки I_0^* , относительно оси, перпендикулярной ДП, равный моменту инерции площади поперечного сечения, расположенного на половине пролёта второго участка балки. За районом среза пояска стойки «на ус» происходит резкое увеличение момента инерции поперечного сечения стойки (рис. 5). Учитывая такое изменение момента инерции поперечного сечения по длине балки, ее условно можно разделить на два участка (рис. 6).

Рис. 5. Изменение момента инерции поперечного сечения стойки на участке, расположенном между палубой и нижней кромкой обшивки фальшборта.

Рис. 6. Расчётная схема к определению коэффициента жёсткости фальшборта и шва составного стержня.

Использование теоремы Кастильяно для определения перемещений в точке В, расположенной на стойке, имеющей срезанный «на ус» поясok или фланец, дало возможность получить величину сдвига δ_3 в продольном направлении. Данная величина сопоставлялась с результатами модельных экспериментов. Погрешность составила 10%.

Учитывая, что податливость фальшборта во много раз меньше податливости шва составного стержня, величиной δ_1 можно пренебречь вследствие её малости. Тогда формулу для определения коэффициента жёсткости системы фальшборт–корпус судна можно записать в виде:

$$k^* = \frac{1}{\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} = \frac{1}{c_2 + c_3}, \quad (6)$$

где k_2 – коэффициент жёсткости корпуса;

$$k_3 = \frac{T_{cp}}{\delta_3 \cdot a} \text{ – коэффициент жёсткости шва;}$$

T_{cp} – усилия среза, действующие на стойку при общем продольном изгибе;

a – расстояние между стойками фальшборта.

После выявления влияния конструктивного оформления фальшборта на величину его податливости мы построили серию графиков, характеризующих это влияние (рис. 7).

Рис. 7. Данные для определения податливости фальшборта; ширина ближайшего к борту пояса равна: 1 – 0 мм; 2 – 60; 3 – 80; 4 – 100 мм.

Закключение

Полученные нами результаты позволили выявить влияние конструктивного оформления фальшборта стойки на её податливость при действии на фальшборт сдвигающего усилия и на степень вовлечения фальшборта в общий продольный изгиб путём оценки коэффициента жёсткости.

Мы определили влияние напряжений в различных элементах системы фальшборт–корпус судна на общий сдвиг стойки фальшборта, что позволило усовершенствовать формулу для определения коэффициента жёсткости.

Результаты данных исследований можно использовать для оценки податливости стоек фальшбортов при проектировании и эксплуатации судов, а также для прогнозирования возможных участков повреждений конструкций.

В дальнейшем мы планируем исследовать напряженно-деформированное состояние конструкций фальшборта с использованием конечноэлементной (вместо стержневой) идеализации сечения стойки для более точного определения геометрических характеристик сечения и учёта большего количества влияющих факторов.

Вклад авторов в статью: Л.И. Чехранова – постановка цели исследования, анализ результатов, общее руководство; А.П. Герман – разработка плана эксперимента, решение задач исследования, работа с текстом и библиографическими источниками, оформление статьи; Я.Р. Домашевская – проведение модельного эксперимента, получение и анализ экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вешуткин В.Д., Жуков А.Е. Экспериментальные исследования вибрации корпуса судна на тензометрических моделях // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 3(105). С. 193–201.
2. Пат. 2595094 Российская Федерация, МПК В 63 В 17/00, В 63 В 17/04. Фальшборт / П.Е. Бураковский, В.М. Юсып, Е.П. Бураковский; Калинингр. гос. техн. ун-т. № 2015126230/11; заявл. 30.06.2015; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 23.
3. Попов А.А. Оптимальное планирование эксперимента в задачах структурной и параметрической идентификации моделей многофакторных систем: монография. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. 296 с.
URL: <http://www.iprbookshop.ru/-45413.html> (дата обращения: 09.11.2019).
4. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2019. URL: <http://www.rs-class.org> (дата обращения: 19.10.2019).
5. Притыкин И.А. Расчёт прочности стоек фальшборта при общем изгибе корпуса судна // Судоремонт Флота рыбной промышленности. 1979. № 40. С. 49–53.
6. РД 5.1122-91. Правила конструирования корпусов морских судов.
7. Черных С.В., Чехранова Л.И. Повреждения судов, швартующихся в море // Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта: сб. науч. тр. Вып. 47. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. С. 233–242.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Ship Design and Construction

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-6>

Chekhranova L., German A., Domashevskaya Ya.

LIDIA CHEKHRANOVA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: li-chehr@mail.ru

ANDREY GERMAN, Associate Professor, ResearcherID: D-1725-2014,
ORCID: 0000-0002-9530-5258, Scopus ID: 56417290300, e-mail: gerand1@yandex.ru

YANA DOMASHEVSKAYA, Postgraduate Student, e-mail: 100-70-100dom@mail.ru

Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, School of Engineering

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Design of bulwark stanchion: effect of the shear force on its flexibility

Abstract: In order to avoid frequent damage to bulwarks on vessels built in different countries with different design options, a systematic analysis of interrelations of design solutions at different stages of the vessel's life cycle is required. The authors of this article present a model experiment that allows to obtain the shape of the elastic line of the bulwark stanchion under the influence of the shear force. The effect of varying the dimensions of the stanchion permitted in compliance with the existing regulatory documents, on the bulwark flexibility in the longitudinal direction, has been determined. The series of diagrams characterizing the bulwark flexibility, depending on its design, have been built. The results of this work can be used in design and operation of vessels.

Keywords: bulwark stanchion, bulwark flexibility, coefficient of rigidity, bulwark-ship hull system, elastic line.

REFERENCES

1. Veshutkin V., Zhukov A. Experimental study of the vibration of the hull on extensometric models. NNSTU: Proceedings of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2014(105);3:193–201.
2. Pat. 2595094 Russian Federation, МПК В 63 В 17/00, В 63 В 17/04. Bulwark / P. E. Burakovsky, V.M. Yusyp, E.P. Burakovsky, Kaliningrad State Technical University. N 2015126230/11; declared 30.06.2015; publ. 20.08.2016, Bull. N. 23.
3. Popov A. Optimal planning of experiment in problems of structural and parametric identification of models of multifactor systems: monograph. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2013, 296 p. URL: <http://www.iprbookshop.ru/45413.html> – 09.11.2019.
4. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. Spb., Russian Maritime Register of Shipping, 2019. <http://www.rs-class.org> –19.10.2019.
5. Pritykin I. Calculation of the strength of the bulwarks in the general bend of the hull. Ship Repair of the Fleet of the Fishing Industry. SPb. 1979(40):49–53.
6. RD 5.1122-9.1. Rules for the design of ships' hulls.
7. Chernykh S., Chekhranova L. Damage to the rigging of ships moored at sea. Proceedings of the FESTU: Researches on improving the efficiency of shipbuilding and ship repair Vladivostok, Far Eastern State Technical Univ. 2009;47:233–242.