

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 625.12:539.4

А. Б. Красюк,
В. Б. Чистов

ДЕФЕКТАЦИЯ И РЕМОНТ ЛИСТОВ ЛЕДОВОГО ПОЯСА ЛЕДОКОЛОВ РЕЧНОГО ФЛОТА

Статья посвящена поиску резервов использования несущей способности пластин обшивки ледового пояса ледоколов, эксплуатирующихся с классом Российского речного регистра. В процессе эксплуатации речных ледоколов на отдельных листах бортовой обшивки отмечен повышенный местный износ, что вызывает необходимость замены данных листов и существенно увеличивает стоимость ремонта.

В статье обосновано использование расчетных значений допускаемых остаточных толщин листов ледового пояса по критериям общего износа и местного износа вместо допускаемых значений, рекомендуемых Правилами Российского Речного Регистра. Использование при дефектации расчетных допускаемых остаточных толщин предусматривает также изменения подхода к дефектации корпуса судна. Применение разработанной методики определения допускаемых толщин расчетным путем позволит существенно сократить затраты на ремонт и способствует более полному использованию несущей способности пластин бортовой обшивки.

Ключевые слова: судно, корпус, ледокол, ледовый пояс, местный износ, общий износ, остаточная толщина.

НА ледоколах смешанного плавания отмечен повышенный износ ледового пояса в узкой зоне, шириной до 0,5 м, и судовладельцу предлагается заменить этот пояс по длине средней части судна, так как толщина его меньше допускаемой остаточной толщины $[t_{\text{ост}}]$ для всего листа ледового пояса [1] – [3]. Правила освидетельствования судов в эксплуатации (ПОСЭ) [1] устанавливают допускаемую остаточную толщину на отдельном участке листа $[t_{\text{ост}}^{\text{м}}]$.

Определим остаточную толщину листа на участке с повышенным износом, при котором разрушение на этом участке не будет происходить. Дефектуемый лист и схема разрушения наиболее изношенных участков показаны на рис. 1.

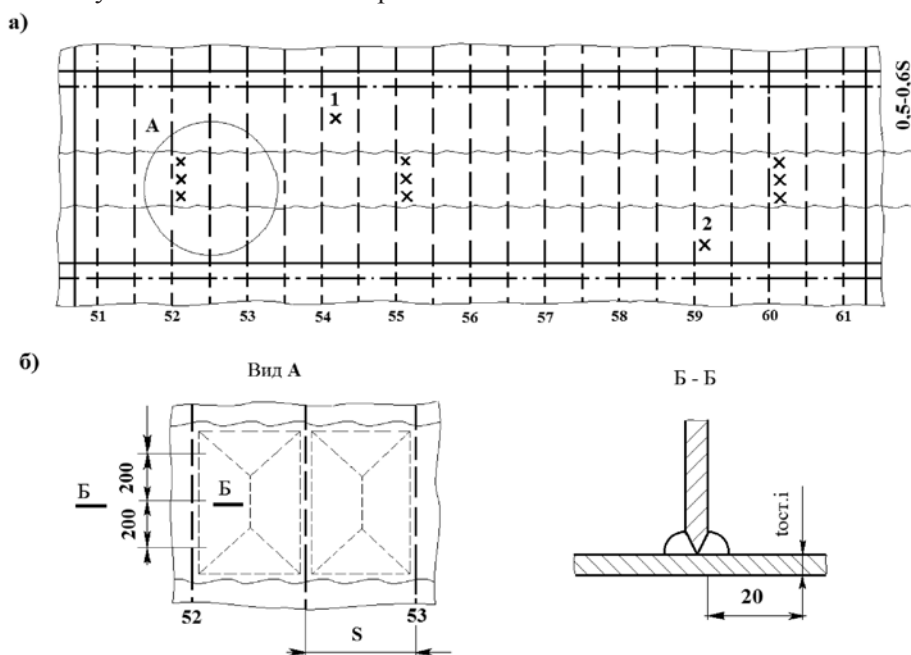


Рис. 1. Дефектуемый лист и схема разрушения наиболее изношенных участков:

а — дефектуемый лист; б — схема разрушения наиболее изношенных участков;

— граница наиболее изношенной части листа; × — точки измерения остаточной толщины листа

Предельная равномерно-распределенная нагрузка для такой схемы разрушения предложена профессором Л. М. Беленьким [4] и определяется по формуле

$$q_0 = \alpha \cdot \frac{M_0}{a^2} \text{ (кг/см}^2\text{)}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{48}{(\sqrt{v^2 + 3} - v)^2}$ — безразмерный коэффициент; $v = \frac{a}{b}$ — отношение короткой стороны прямоугольника к длинной; $M_0 = \sigma_t \cdot \frac{t^2}{4}$ — предельный изгибающий момент на 1 см длины пластического шарнира; σ_t — предел текучести материала, кг/см²; t — толщина обшивки, см.

После перевода в систему СИ получим

$$q_0 = \alpha \cdot R_{eH} \cdot \frac{t^2}{4} \cdot \frac{1}{a^2}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где t — толщина обшивки, м; a — длина короткой стороны пластины, м; R_{eH} — предел текучести материала, МПа.

Для ледоколов по Правилам постройки судов внутреннего плавания РРР (ПСВП) [2], расчетное давление на обшивку ледового пояса в носовом районе, МПа:

$$p_n = 1,4 + 0,004D^{1/4} \cdot P^{1/3}, \quad (3)$$

где D — водоизмещение судна при осадке по конструктивную ватерлинию, кН; P — суммарная мощность на гребных валах, кВт.

Расчетное давление льда на обшивку ледового пояса, МПа:

– в среднем районе

$$p_c = 0,60 \cdot p_n; \quad (4)$$

– в кормовом районе

$$p_k = 0,75 \cdot p_n. \quad (5)$$

Толщина обшивки ледового пояса в соответствии с ПСВП [2], [5] должна быть, мм, равна

$$t = 720s \sqrt{\frac{p}{R_{eH}}}, \quad (6)$$

где p — расчетное давление льда, МПа, по (3), (4) или (5); s — расстояние между балками набора, м.

Допускаемая толщина отдельного листа в эксплуатации определяется по [1]

$$[t_{\text{ост}}] = 0,8t. \quad (7)$$

Допускаемая толщина на участке листа с повышенным износом, определяемая также по [1], составит

$$[t_{\text{ост}}^M] = 0,85[t_{\text{ост}}]. \quad (8)$$

Допускаемую остаточную толщину на участке с повышенным износом (мм) найдем из условия, что расчетное давление на обшивку ледового пояса по (3), (4) или (5) равно предельному, определенному по формуле (2) с учетом запаса на износ на период между освидетельствованиями. С учетом сказанного получим

$$[t_{\text{ост}}] = 10^3 s \sqrt{\frac{4p}{\alpha \cdot R_{eH}}} + C_p \cdot \Delta T, \quad (9)$$

где $[t_{\text{ост}}]$ — допускаемая средняя остаточная толщина на участке с местным износом, мм; C_p — расчетная скорость изнашивания на участке ледового пояса с повышенным износом, ΔT — период времени в годах между освидетельствованиями листа.

Допускаемую остаточную толщину на участке с повышенным местным износом можно представить в виде

$$[t_{\text{ост}}^{\text{м}}] = t_{\text{пред}}^{\text{м}} + C_p \cdot \Delta T, \quad (10)$$

а предельную местную остаточную толщину как

$$t_{\text{пред}}^{\text{м}} = \frac{b}{s} \sqrt{\frac{4}{\alpha}} \cdot 10^3 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{p}{R_{eH}}} \quad \text{при } b > s. \quad (11)$$

Предельную местную остаточную толщину найдем из условия, что при действии расчетной нагрузки P (МПа) разрушение на участке пластины шириною b не будет происходить ранее, чем от этой нагрузки будет разрушаться вся пластина. Схема разрушения пластины на отдельных участках размером $b \times s$, где s — меньшее расстояние между балками набора пластины, b — пространство участка разрушения вдоль длинной стороны пластины, показана на рис. 2, а.

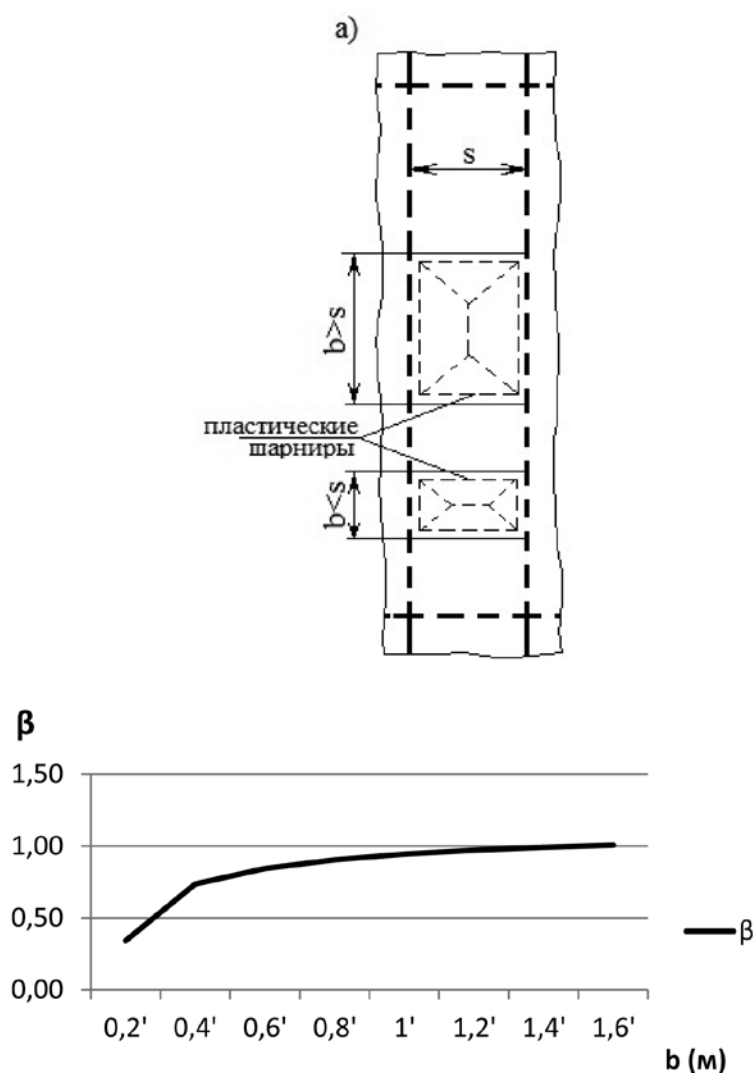


Рис. 2. Разрушение пластины на отдельных участках при действии предельной нагрузки q_0 :
а — возможные схемы разрушения; б — значения коэффициента уменьшения допускаемой толщины на участке, где может произойти разрушение

Используя выражения (7), (10) и (11) можно представить зависимость для определения предельной местной остаточной толщины, при которой не будет происходить разрушение на отдельном участке до того, как наступит предельное состояние во всей пластине.

$$t_{\text{пред}}^{\text{м}} = \beta ([t_{\text{ост}}^{\text{м}}] - C_p \cdot \Delta T); \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{пл}}}{\alpha_{\text{м}}}} \quad \text{при } b > s; \quad \beta = \frac{b}{s} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{пл}}}{\alpha_{\text{м}}}} \quad \text{при } b < s, \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{пл}}$ и $\alpha_{\text{м}}$ — безразмерные коэффициенты из формулы (1) для всей пластины и для отдельного ее участка.

Значения коэффициента уменьшения допускаемой остаточной толщины на участке, где может произойти разрушение, при длине пластины 1,5 м показаны на рис. 2, б.

При дефектации листа определение его остаточной толщины выполняется следующим образом [6] — [8]:

– измеряется остаточная толщина листа в двух точках вне зоны с повышенным износом в середине поля пластины, как это показано на рис. 1, а (точки 1 и 2);

– измеряются остаточные толщины в зоне с повышенным износом, по три точки у трех шпангоутов, как показано на рис. 1, б;

– определяется средняя остаточная толщина $t_{\text{ост}}$ по формуле

$$t_{\text{ост}} = \frac{1}{3} \left(t_{\text{изм.1}} + t_{\text{изм.2}} + \frac{1}{9} \sum_3^{11} t_{\text{изм.}i} \right); \quad (14)$$

– определяется средняя остаточная толщина в зоне с повышенным износом $t_{\text{ост}}^{\text{м}}$ по формуле

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} = \frac{1}{9} \sum_3^{11} t_{\text{изм.}i}. \quad (15)$$

Лист ледового пояса наружной обшивки в средней части ледокола считается годным и не требует ремонта, если выполняются два условия (16) и (17):

$$t_{\text{ост}} \geq 0,8 t_{\text{пр}}. \quad (16)$$

Средняя толщина листа, определенная по формуле (14), больше допускаемой, определенной по формуле (7).

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} \geq 0,85 [t_{\text{ост}}]. \quad (17)$$

При ширине пояса с повышенным износом, определенным по графику на рис. 2, не более $b = 0,7$ м.

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} \geq 0,5 t_{\text{пр}}. \quad (18)$$

При ширине пояса с повышенным износом, определенным по графику на рис. 2, не более $b = 0,2$ м.

Значения допускаемой остаточной толщины в зависимости от ширины пояса с повышенным износом показаны в табл. 1.

Таблица 1

Допускаемая остаточная толщина в зоне с повышенным износом

b	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$[t_{\text{ост}}^{\text{м}}]$	$0,5 t_{\text{пр}}$	$0,52 t_{\text{пр}}$	$0,58 t_{\text{пр}}$	$0,64 t_{\text{пр}}$	$0,67 t_{\text{пр}}$	$0,68 t_{\text{пр}}$

Для ледокола «Капитан Крутов» допускаемую остаточную толщину пластины или ее части можно определить по формуле (9), используя следующие данные [9] – [11]:

– основные размерения: длина между перпендикулярами $L = 71$ м; ширина $B = 16,3$ м; осадка $T = 3,5$ м; водоизмещение $D = 2463$ т;

– мощность силовой установки $N = 3 \cdot 1440$, кВт;

– расстояние между основными и промежуточными шпангоутами $s = 0,3$ м;

- предел текучести материала корпуса в зонах ледовых усилений $R_{eH} = 315$ МПа;
- проектная толщина обшивки ледового пояса $t_{пр} = 12,5$ мм;
- скорость изнашивания листов ледового пояса наружной обшивки C_p принимается по зависимостям Правил РРР [2]

$$C_p = (1 + 1,65\gamma)C = (1,0 + 1,65 \cdot 0,40) \cdot 0,10 = 0,166, \text{ мм/год.}$$

Причем, коэффициент вариации составляет $\gamma = 0,51 - 1,06C = 0,40$.

Средняя скорость изнашивания по табл. 2.1.16 (ПССП часть I «Корпус») равна $C = 0,10$, мм/год.

Полученная расчетом $C_p = 0,166 > C_{max} = 0,13$, мм/год, зафиксированной при дефектации корпуса на участках с повышенным износом.

Расчетное давление на пластину ледового пояса в средней части судна по Правилам РРР (зависимость 3) равно

$$P_c = 0,60 (1,4 + 0,004 (9,81 \cdot 2463)^{1/4} (3 \cdot 1440)^{1/3}) = 1,327, \text{ МПа.}$$

После подстановки данных по л/к «Капитан Крутов» в зависимости (9), (10) и (11) получим значения допускаемой остаточной толщины всего листа и значения допускаемой остаточной толщины листа на отдельных участках ледового пояса в средней части. В табл. 2 приведены значения допускаемых остаточных толщин для всего листа и для участков с повышенным износом.

Таблица 2

Остаточные толщины листов ледового пояса ледокола «Капитан Крутов»

Остаточная толщина	Допускаемая по расчету, мм	Допускаемая ПОСЭ, мм	Минимальное фактическое значение в 2011 г. (2015 г.)*, мм
Средняя для листа	9,5	10,0	10,0 (9,6)
На участке при $b \leq 0,5$ м	7,8	8,5	8,3 (7,9)
На участке при $b \leq 0,3$ м	6,5	8,5	8,3 (7,9)

* значения остаточных толщин в 2015 г. определены расчетным путем с учетом возможного износа с момента последней дефектации в 2011 г.

Из табл. 2 видно, что остаточные толщины ледового пояса ледокола «Капитан Крутов» удовлетворяют требованиям Правил РРР, а использование рассчитанных нормативов дает возможность продлить эксплуатацию корпуса без замены участков с повышенным износом не только до следующего очередного освидетельствования, но и на пять лет после него.

Заключение

Предложенное обоснование допустимой остаточной толщины листов ледового пояса показало, что она может быть существенно уменьшена. Данное уменьшение допустимой остаточной толщины позволит еще длительное время эксплуатировать ледоколы без замены участков листов ледового пояса с повышенным износом.

Это позволяет получить только по ледоколу «Капитан Крутов» экономию материала в размере 3,7 т (в сумме 131 673 тыс. руб.), труда 804,5 норм. час. Общая экономия затрат на ремонт корпуса ледокола, представляющая собой часть стоимости ремонтных работ, связанная исключительно с заменой листов ледового пояса с повышенным износом, равна 347 163 тыс. руб. При расчетах трудоемкости, себестоимости и стоимости ремонтных работ были использованы данные ЗАО «Канонерский судоремонтный завод». В расчетах себестоимости не были учтены расходы, связанные с использованием судоподъемного сооружения (дока), так как стоимость услуг дока зависит от общего количества суток докования и нет прямой связи между данным показателем и объемами замены участков ледового пояса с повышенным износом.

Тем не менее, если определяющим фактором в объеме ремонтных работ по ледоколу будет именно замена листов ледового пояса, то следует ожидать также и снижения экономических потерь судовладельца от простоя судна и оплаты судоподъемного сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила освидетельствования судов в эксплуатации (ПОСЭ). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 1. — 112 с.
2. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 2, Ч. I. «Корпус». — 452 с.
3. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила классификации и постройки судов смешанного (река-море) плавания (ПССП). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 4. — 317 с.
4. Беленький Л. М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии / Л. М. Беленький. — Л: Судостроение, 1983. — 448 с.
5. Барышников С. О. Об оптимальном сроке службы корпуса судна / С. О. Барышников, А. Б. Березина, В. Б. Чистов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — № 1 (117). — С. 234–244.
6. Чистов В. Б. Анализ влияния погрешностей при определении остаточных толщин на прочностные характеристики пластин обшивок и настилов корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк, М. Г. Пеликова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 58–66.
7. Красюк А. Б. Методологические основы дефектации стальных корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 87–93.
8. Красюк А. Б. Влияние погрешностей в определении остаточных толщин элементов корпусных конструкций на общую прочность корпуса судна / А. Б. Красюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 70–77.
9. Расчет прочности и определение допустимых остаточных толщин корпуса л/к «Капитан Крутов» (класс «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А»). — № 1105/КК/11-01: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.
10. Расчет прочности л/к «Капитан Крутов» (класс «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А»). — № 1105/КК/11.09-02: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.
11. Ремонт и расчет элементов ледового пояса корпуса л/к «Капитан Крутов» при его эксплуатации в классе «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А». — № 1105/КК/11-02: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.

DEFECT DETECTION AND REPAIR OF ICE BELT SHEETS FOR INLAND WATER ICEBREAKERS

The article is devoted to the search for reserves of using the bearing capacity of the ice belt plating of icebreakers operated with the class of the Russian River Register. In the operation of river icebreakers on separate plates the side shell is marked increased local wear, which causes the need to replace these plates and significantly increases the cost of repair.

The article substantiates the use of the calculated values of permissible residual thickness of the ice belt sheets according to the criteria of local and general wear, instead of allowed values recommended by the Rules of the Russian River Register. Using while inspecting the calculated permissible residual thickness also provides for changes in approach to defect detection of the ship hulls elements. Using of the developed method of determining the permissible thickness by calculation will significantly reduce maintenance costs and enhances the use of the bearing capacity of the side shell plates.

Keywords: ship, ship's hull, icebreaker, ice belt, local wear, general wear, the residual thickness.

REFERENCES

1. The Russian River Register / Rules for the inspection of operation (CSE) / Volume 1. M.: On the Volga, 2008: 112 p.
2. The Russian River Register / Rules for classification and construction of inland waterway vessels (PSVP) / Volume 2, Part I «housing». M.: On the Volga, 2008: 452 p.
3. The Russian River Register / classification rules and construction of mixed (river-sea) (OADs) / Volume 4. M.: On the Volga, 2008: 317 p.
4. Belenky, L. *Calculation of ship structures in the plastic stage*. L: Shipbuilding, 1983: 448 p.
5. Baryshnikov, S. O., A. B. Berezina, and V. B. Tchistov. "On the optimal service life of the hull." *Scientific and technical statements STU* 1(117) (2011): 234–244.

6. Tchistov, V. B., A. B. Krasnyuk, and M. G. Pelikova. "Analysis of errors impact on the strength characteristics of the ship's hull plates and decks in determination of residual thickness." *Journal of University of Water Communications* 2 (2013): 58–66.
7. Krasnyuk, A. B., and V. B. Tchistov. "Methodological outlines of the defect detection of the vessels steel hulls." *Journal of University of Water Communications* 3(19) (2013): 87–93.
8. Krasnyuk, A. B. "Influence of errors in the determination of the residual thickness of elements of hull structures on the total strength of the ship's hull." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (21) (2013): 70–77.
9. The calculation of the strength and determination of the permissible residual thickness of the hull structures for the icebreaker «Captain Krutov» (class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A»). №1105 / СК / 11-01. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).
10. The calculation of the strength of the icebreaker «Captain Krutov» (class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A»). №1105 / СК / 11-09-02. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).
11. Repair and calculation of elements of the ice belt for the icebreaker «Captain Krutov» at its operation in the class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A». №1105 / СК / 11-02. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красюк Алла Борисовна —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
krasyuk_a_b@mail.ru
Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ChistovVBgumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krasyuk Alla Borisovna —
Candidate of Engineering,
associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
krasyuk_a_b@mail.ru
Tchistov Valentin Borisovitch —
Doctor of Engineering, professor.
ChistovVBgumrf.ru

УДК 629.12

**М. П. Лебедева,
А. Б. Васильева,
Т. Н. Инютина**

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРПУСА СУДНА С ПЛОСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКОЙ

В работе приводятся результаты анализа экспериментального исследования сил и моментов взаимодействия модели голого корпуса судна и плоской вертикальной стенки. Эти данные необходимы для решения задач управления судном в процессе швартовки и при движении в узкости.

Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик было выполнено в начале 1990-х гг. в циркуляционном бассейне ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Тогда работа была приостановлена за неимением технических средств. Как показал обзор литературы, несмотря на то, что с момента выполнения исследований прошло более 20 лет, новой информации по вопросу о взаимодействии корпуса судна со стенкой не появилось. Ввиду того, что задача о динамике движения судна в узкости по-прежнему остается актуальной и по-прежнему ее корректное решение невозможно из-за отсутствия данных о гидродинамических характеристиках, приостановленная работа была продолжена. Обработанные данные и результаты их анализа, дающие возможность оценить количественно силы и моменты на голом корпусе судна, обусловленные влиянием плоской вертикальной стенки, приведены в статье.

Ключевые слова: гидродинамическое взаимодействие, эксперимент, модель судна, плоская стенка, угол разворота.