

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761

MEASUREMENT OF RESIDUAL DEVIATIONS OF THE SHIP'S HULL AXIS FROM THE INITIAL POSITION

S. O. Baryshnikov, A. B. Krasiuk, V. B. Chistov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article discusses a method for measuring deviations of the deformed axis of a ship's hull from the initial (non-deformed) position that arise with a general residual bend or deflection. The Rules of the Russian Classification Society (RCS) and the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) do not have standards for assessing the main characteristics of such deformations (the maximum bend or deflection arrow). Nevertheless, this defect has a significant impact on the overall strength and reliability of the ship's hull in operation and can cause sudden failure. The presence of general residual deformations of the hull not only negatively affects the strength and reliability of the hull, but also complicates cargo operations and leads to errors in determining the amount of cargo in the tanks of tankers. The result of the research presented in this article is a new technique for measuring deviations of the hull axis of a ship with general residual deformations from its initial non-deformed state, mathematical dependencies for calculating the exact coordinates of the deformed hull axis. This will make it possible to more accurately assess the level of overall strength of the hull, and, if necessary, develop a technological process for elimination the overall residual bend (deflection). The procedure for determining the parameters of general residual deformations is further complicated by the fact that the maximum inflection (deflection) arrow obtained from the measurement results also includes an elastic component. The developed mathematical dependencies make it possible to exclude from the maximum arrow of bend (deflection) obtained as a result of measurements the elastic component caused by the load acting on the ship's hull. A device has been developed for recording deviations of the axis of a deformed ship's hull from the initial (non-deformed) position. The new measurement technique and this device will allow measurements not only when the vessel is on a slip or in a dock, but also afloat at quay wall. Due to the fact that the geometric characteristics of the section along the length of the ship's hull change, the optimal number of measured sections (5–7) in the area of the cylindrical insert is justified, with the length of each section a multiple of the frame spacing. An example is given of calculating the ordinates of the residual curved axis of the body based on the measurement results and determining the curvature in each of the deformed sections.

Keywords: total residual deformation, total residual bending, curvature of the hull section, measuring the curvature of the hull, elimination of hull curvature, strength level, bending moment.

For citation:

Baryshnikov, Sergei O., Alla. B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. "Measurement of residual deviations of the ship's hull axis from the initial position" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 749–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761.

УДК 625.12:539.4

ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОСИ КОРПУСА СУДНА ОТ ИСХОДНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен способ измерения отклонений деформированной оси корпуса судна от исходного (недеформированного) положения, возникающих при общем остаточном перегибе или прогибе. Отмечается,

что данный дефект может существенно снизить уровень общей прочности и надежности корпуса судна в процессе эксплуатации и явиться причиной внезапного отказа. Кроме того, наличие общих остаточных деформаций корпуса не только отрицательно влияет на прочность и надежность корпуса, но и затрудняет выполнение грузовых операций, а также приводит к погрешностям в определении количества груза в танках наливных судов. Результатами проведенного исследования являются новая методика измерения отклонений оси корпуса судна с общими остаточными деформациями от ее исходного недеформированного состояния и новые математические зависимости для вычисления точных координат деформированной оси корпуса. Эти новации позволяют более точно оценить уровень общей прочности корпуса и при необходимости разработать технологический процесс устранения общего остаточного перегиба (прогиба). Подчеркивается, что процедура определения параметров общих остаточных деформаций усложняется еще и тем, что максимальная стрелка перегиба (прогиба), полученная по результатам измерений, включает также упругую составляющую. Разработанные математические зависимости позволяют исключить из максимальной стрелки перегиба (прогиба), получаемой в результате измерений, упругую составляющую, вызванную нагрузкой, действующей на корпус судна. Разработано приспособление для фиксации отклонений оси деформированного корпуса судна от исходного (недеформированного) положения. Новая методика измерений и данное приспособление позволяют выполнять измерения не только при нахождении судна на слипе или в доке, но и на плаву у причальной стенки. В связи с тем, что геометрические характеристики сечений по длине корпуса изменяются, обосновано оптимальное число измеряемых участков (5–7) в районе цилиндрической вставки при длине каждого участка, кратной рамной шпации. Дан пример определения кривизны корпуса на каждом из деформированных участков путем пересчета результатов измерений в точные ординаты положения остаточной изогнутой оси.

Ключевые слова: общая остаточная деформация, общий остаточный перегиб, искривление участка корпуса, измерение кривизны корпуса, устранение кривизны корпуса, уровень прочности, изгибающий момент.

Для цитирования:

Барышников С. О. Измерение остаточных отклонений оси корпуса судна от исходного положения / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 749–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-749-761.

Введение (Introduction)

Грузовые суда внутреннего и смешанного плавания в процессе эксплуатации и ремонта могут получить значительные общие деформации [1]–[3]. Обычно это суда 1-й группы по классификации Российского классификационного общества (РКО) с отношением длины судна L к высоте борта H более 15 ($L/H > 15$). Такие суда могут иметь общий остаточный перегиб (палуба растянута, днище сжато) с максимальной стрелкой перегиба, превышающей 800 мм [3]–[5].

Наличие в корпусе судна общих остаточных деформаций (перегиба либо прогиба) не приводит к снижению скорости судна за счет роста сопротивления воды, однако усложняет работы по подъему судна на слип (в док). Данный дефект изменяет осадку отдельных частей корпуса, не оказывая влияния на местную прочность, но может снизить уровень общей прочности. Изменение положения оси корпуса при общем остаточном прогибе или перегибе приводит к тому, что изменяется распределение сил поддержания по его длине, тогда как распределение сил веса при заданной загрузке судна остается неизменным. В итоге появляется дополнительный изгибающий момент, действующий на корпус судна. В случае, если он имеет знак, противоположный расчетному изгибающему моменту в недеформированном состоянии, последний уменьшается. При совпадении знаков итоговое значение расчетного изгибающего момента будет больше, чем у корпуса судна без общих остаточных деформаций, что уменьшит общую прочность корпуса судна. Влияние остаточного перегиба (прогиба) корпуса может сказаться на уровне его общей прочности корпуса из-за уменьшения коэффициента запаса, вызванного появлением остаточных напряжений в корпусе при возникновении перегиба (прогиба).

Целью исследования является разработка нового способа измерения отклонений деформированной оси корпуса судна от исходного положения при перегибе или прогибе судна. Для более точных измерений общих остаточных деформаций предлагается использовать приспособление оригинальной конструкции. Пересчет результатов измерений в точные ординаты положения остаточной изогнутой оси при этом будет выполняться по математическим зависимостям, позволяющим исключить упругую составляющую, вызванную нагрузкой, действующей на корпус судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работах профессора Г. В. Бойцова [5], [6] предложено учитывать влияние общих остаточных деформаций на общую прочность корпуса не во всех случаях, а только тогда, когда остаточная стрелка перегиба или прогиба превышает нормативное значение:

$$f_{oH} = L \left(\frac{R_{eH}}{E} \right) \left(\frac{L}{15H} \right), \quad (1)$$

где R_{eH} — предел текучести материала палубы (комингса) или днища, МПа;

E — модуль упругости материала, МПа;

H — высота борта корпуса в миделевом сечении, м;

L — расчетная длина судна, м.

При наличии у корпуса судна остаточного перегиба или прогиба, в его крайних связях появляются остаточные напряжения. Поэтому при выполнении расчетов общей прочности для корпусов, имеющих фактическую стрелку прогиба (перегиба) f_o , превышающую нормативное значение f_{oH} , согласно источнику [6], нормативный коэффициент запаса прочности следует увеличить пропорционально коэффициенту:

$$k_f = 1 + 0,1 \left[(f_o / f_{oH}) - 1 \right] \geq 1. \quad (2)$$

Согласно [6], годному техническому состоянию соответствует следующее условие общей предельной прочности:

$$M^* \geq K_{\text{годн}} k_f (M_p + \Delta M), \quad (3)$$

где M^* — фактическое значение предельного изгибающего момента, учитывающее имеющиеся в корпусе судна износы и местные остаточные деформации (при перегибе и прогибе), по абсолютному значению, кН · м;

M_p — значение изгибающего момента, принятого в качестве расчетного, кН · м;

ΔM — дополнительный изгибающий момент для судна с общими остаточными деформациями и связанным с ними изменением сил поддержания, кН · м;

$K_{\text{годн}}$ — коэффициент запаса прочности для годного технического состояния по Правилам РКО¹.

Нормативные значения коэффициентов запаса уровня общей прочности приведены в следующей таблице.

Нормативные значения коэффициентов запаса прочности

Класс судна (по Правилам РКО)	$K_{\text{годн}}$
«Л», «Р», «О», «М»	1,15
«О-ПР»	1,19
«М-ПР»	1,26
«М-СП»	1,27

В Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС)² вопрос о влиянии общих остаточных деформаций корпуса на его техническое состояние не рассматривается, а в Правилах Российского классификационного общества (РКО) при оценке уровня технического состояния судна с общими остаточными деформациями предлагается, независимо от величины стрелки остаточного перегиба (прогиба), не допускать к эксплуатации суда с признаками наметившегося перелома. Такой подход к нормированию дефекта (максимальной стрелки остаточного перегиба) связан со сложностью его определения. Чтобы определить остаточный общий перегиб, необходимо измерить

¹ Правила освидетельствования судов в процессе их эксплуатации (ПОСЭ). М.: РКО, 2019.

² Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II: Корпус. СПб.: РМРС, 2019.

максимальную стрелку перегиба при заданной нагрузке, исключив из него упругую составляющую, вызванную этой нагрузкой. Вычисление упругой составляющей осложняется тем, что приходится рассчитывать упругие перемещения в брус переменного сечения, а геометрические характеристики сечений бруса меняются по длине корпуса не только по конструктивным соображениям, но и ввиду неравномерного износа его элементов.

Способы аналитического вычисления максимальной упругой стрелки перегиба корпуса при заданной загрузке (известны эпюры поперечной силы и изгибающего момента) представлены в таблицах справочников по строительной механике, например, в [7]. Однако изменения геометрических характеристик сечений по длине корпуса сохраняются и усложняют расчет.

Ранее был разработан несколько иной подход к определению расположения остаточной изогнутой оси корпуса. Этот подход, основанный на измерениях остаточной кривизны корпуса по его участкам, нашел отражение в патенте [8] и технологической инструкции [9]. Отличие способа определения параметров общих остаточных деформаций корпуса судна, предложенного в данной статье, от подхода, изложенного в [8], состоит в следующем:

- в использовании иной методики измерений;
- в разработанных математических зависимостях для исключения упругой составляющей изгиба;
- в использовании нового приспособления для фиксации отклонений, позволяющего выполнять измерения не только при нахождении судна на слипе или в доке, но и на плавучей причальной стенке.

Прогиб изогнутой оси корпуса может быть определен по формуле

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i^{\text{ост}} (L - L_i)}{L} x - \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2 \left| x \geq \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \right|} - \frac{C_i^{\text{ост}} \left(x - \left(L_i + \frac{l}{2} \right) \right)^2}{2 \left| x \geq \left(L_i + \frac{l}{2} \right) \right|} \right), \quad (4)$$

где $y_{\text{ост}}(x)$ — прогиб изогнутой оси корпуса, измеренный на расстоянии x от кормового перпендикуляра;

$C_i^{\text{ост}}$ — кривизна i -го участка корпуса;

l — принимаемая кратной рамной шпации длина измеряемого участка (около 6–10 м);

L — длина корпуса между перпендикулярами;

L_i — расстояние от середины i -го измеряемого участка до кормового перпендикуляра при выполнении следующих условий:

$$x \geq \left(L_i - \frac{l}{2} \right) \text{ и } x \geq \left(L_i + \frac{l}{2} \right).$$

Для получения формулы (4) использованы дифференциальные зависимости, описывающие изгиб балки. На основе данных зависимостей базируется графоаналитический способ определения перемещений. В данном случае прогиб в любой точке равен изгибающему моменту в сечении фиктивной балки под действием распределенной нагрузки, равной кривизне отдельного участка. Схема такой фиктивной балки приведена на рис. 1.

Кривизну каждого измеряемого участка корпуса можно определить различными способами: по результатам измерений стрелки прогиба на заданной длине участка палубы [10], по результатам измерений отклонений расстояния от горизонтальной плоскости до палубы [10], [11] или по измерению угла отклонения нормали от вертикали в начале и в конце изогнутого участка корпуса [11], [12]. Соотношения между измеряемыми характеристиками изогнутой оси приведены на рис. 2.

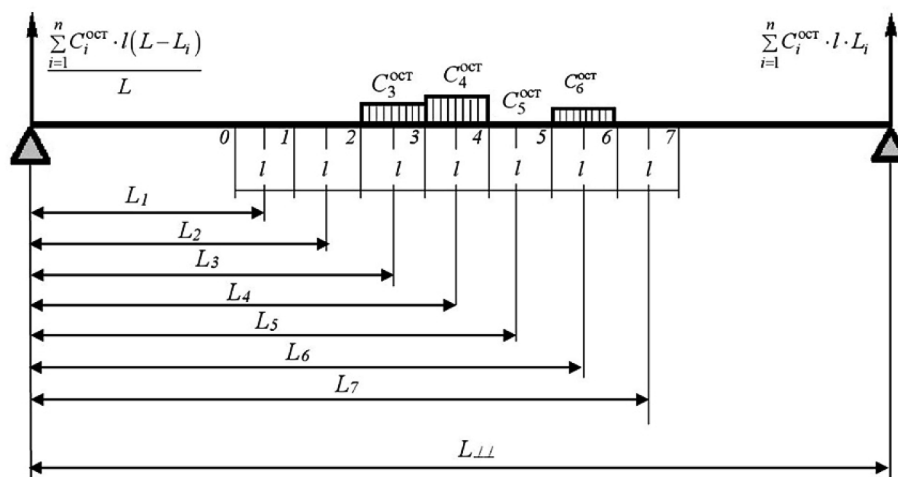


Рис. 1. Схема фиктивной балки, графически отображающая определение положения изогнутой оси корпуса

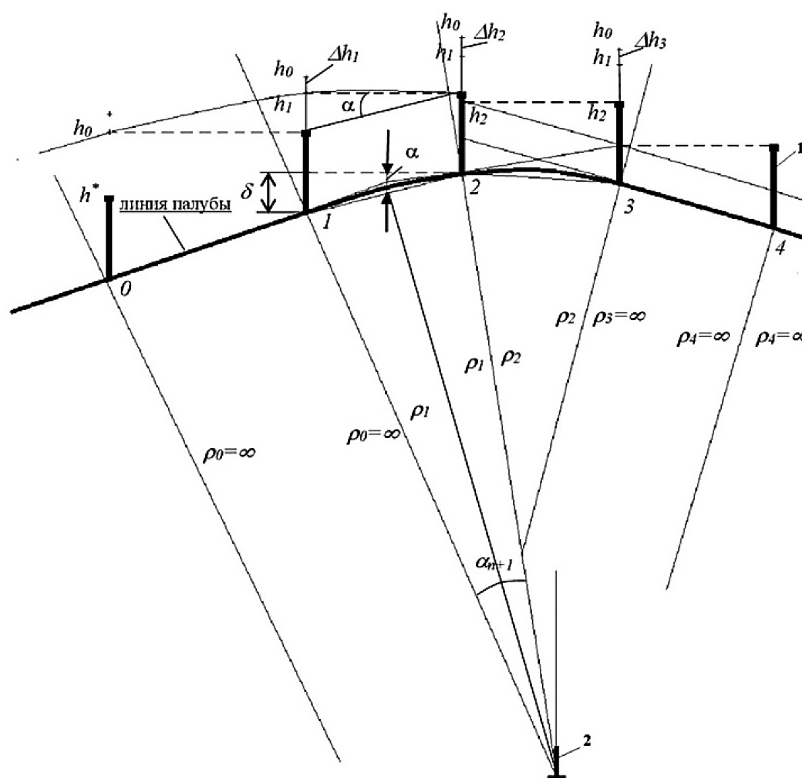


Рис. 2. Соотношения между измеряемыми характеристиками изогнутой оси корпуса:
1 — штатив с лазерным нивелиром; h^* — расстояние от палубы до горизонтальной плоскости;
2 — переносная стойка с приспособлением для фиксирования изменения расстояния от палубы в начале каждого участка измерений Δh_i

Рассчитать остаточную кривизну каждого участка корпуса, а также ординату остаточной изогнутой оси и остаточную стрелку перегиба корпуса можно с помощью фиксации изменения отклонений от горизонтали в начальной и конечной точках участка. Измерения выполняются на участках 5–7 в средней части корпуса (рис. 3). Это объясняется тем, что на крупных грузовых судах с $L/H > 15$ этот район располагается в зоне цилиндрической вставки с постоянной изгибной жесткостью, в которой из-за чрезмерных нагрузок может появиться искривление некоторых участков.

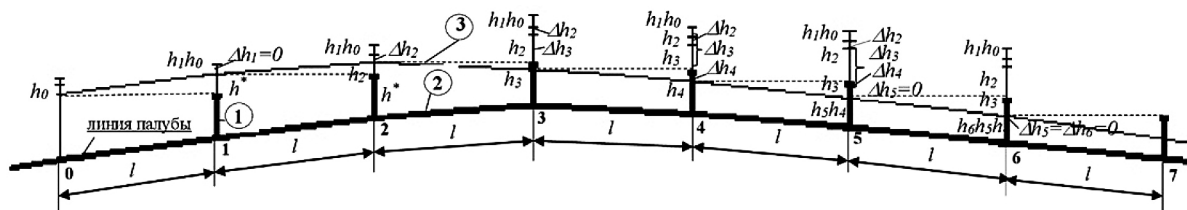


Рис. 3. Измерение отклонений деформированной оси корпуса от исходного положения:

1 — штатив с визиром (лазерный нивелир); 2 — линия палубы;
3 — фактическое расположение деформированной оси корпуса

Стойка и штатив устанавливаются последовательно в начале в конце каждого участка на пересечении бимса и карлингса. Высота штатива за все время измерений не меняется (h^* — зафиксирована). На стойке устанавливается приспособление для фиксации изменения расстояния от палубы Δh_i (рис. 4).

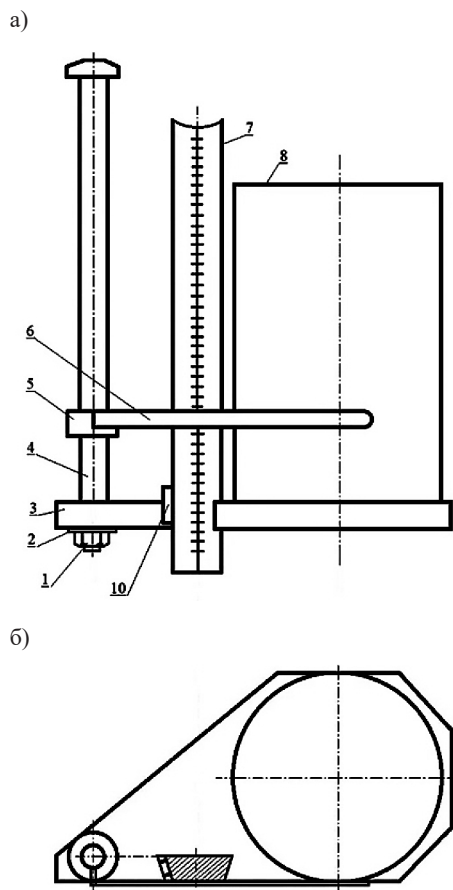


Рис. 4. Приспособление для фиксации отклонений:

а — вид спереди; б — вид сверху

Условные обозначения:

1 — гайка-барашек М10 (2 шт.); 2 — шайба (2 шт.);
3 — платформа (1 шт.); 4 — ось (2 шт.); 5 — ползун (1 шт.); 6 — стрелка (1 шт.);
7 — стойка нивелира (1 шт.); 8 — стакан (1 шт.); 9 — планка; 10 — клин (1 шт.)

Изменение расстояния от палубы предлагается измерять следующим образом:

1. На барабане приспособления закрепляется лист миллиметровки, по образующей барабана измеряются отклонения деформированной оси корпуса от исходного положения в натуральную величину, по окружности барабана откладывается длина участков в масштабе 1 : 500.

2. Стойка с приспособлением устанавливается в начале первого участка (точка 0 на рис. 3), а штатив с лазерным нивелиром — на конце первого участка (точка 1 на рис. 3). Приспособление на стойке устанавливается так, чтобы проекция перекрестья нивелира на барабане была началом графика расположения деформированной оси корпуса. Приспособление закрепляется на стойке 7 с помощью клина 8. Начало графика фиксируется на миллиметровке барабана, затем фиксируются расстояния от палубы h_0 и h^* .

3. Стойка с закрепленным по высоте приспособлением переносится на начало второго участка (точка 1), а барабан приспособления поворачивается по часовой стрелке на длину первого участка. Штатив с лазерным нивелиром без корректировки по высоте устанавливается в конце второго участка (точка 2 на рис. 3). На вертикали из точки 1 фиксируется проекция перекрестья лазерного нивелира, отмечается расстояние от палубы h_1 и изменение расстояния от палубы Δh_1 .

4. Процедура, описанная в пп. 3, повторяется на всех участках, а также определяются величины h_n и Δh_n .

Для вычисления максимальной стрелки перегиба, оказывающей влияние на уровень общей прочности судна и кривизны на деформированных участках, необходимой для разработки технологического процесса ремонта, устанавливается связь между кривизной на каждом участке и изменением ординаты в конце каждого из них Δh_n . С этой целью используется условие:

$$\Delta h_n = h_{n-1} - h_n. \quad (5)$$

В соответствии с рис. 2 имеем:

$$h_{n-1} = h^* + \delta; \quad h_n = h_0 - \sum_{i=1}^n \Delta h_i. \quad (6)$$

Высота хорды дуги на участке n составляет

$$f_n = \frac{C_n l_n^2}{8}, \quad (7)$$

где C_n — кривизна участка.

Угол между касательной к дуге и хордой у конца участка n равен:

$$\alpha_n^{\text{оп}} = \frac{C_n l_n}{2} = \frac{8 f_n l_n}{l_n^2} = \frac{4 f_n}{l_n}, \quad (8)$$

угол между горизонталью и хордой составляет

$$\alpha_n = \frac{8 f_n}{l_n}. \quad (9)$$

С учетом формулы (9) величина отклонения палубы от горизонтальной плоскости будет равна

$$\delta = l_n \frac{8 f_n}{l_n} = 8 f_n. \quad (10)$$

После подстановки в условие (5) значений из (6) и (10) получим

$$\Delta h_n = h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta h_i - h^* - 8 f_n. \quad (11)$$

Из выражения (11) после преобразований получим значения кривизны на каждом участке:

$$C_n = \frac{1}{l_n} \left(h_0 - h^* - \sum_{i=1}^n \Delta h_i \right). \quad (12)$$

В качестве примера далее приведены результаты вычислений координат деформированной оси корпуса, полученные на основе измерений Δh . Рассмотрено пять вариантов для судна длиной $L_{\perp} = 140$ м с длиной цилиндрической вставки 70 м. В каждом случае был выполнен расчет ординат по формулам:

$$h_0 = \frac{L_0}{L_{\perp}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{l_i} (L_{\perp} - (L_i - 0,5l_i)); \quad (13)$$

$$h_n = \frac{L_{\perp} - L_n}{L_{\perp}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{l_i} (L_{\perp} - (L_i - 0,5l_i)). \quad (14)$$

Вариант 1

$L_0 = 35 \text{ м}$	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{5}{10} \cdot 100 + \frac{2}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{3}{10} \cdot 70 + \frac{2}{10} \cdot 60 + \frac{2}{10} \cdot 50 \right) =$ $= \frac{35}{140} (50 + 18 + 0 + 21 + 12 + 10) = 27,75 \text{ мм}$ $h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{5}{10} \cdot 40 + \frac{2}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{3}{10} \cdot 70 + \frac{2}{10} \cdot 80 + \frac{2}{10} \cdot 90 \right) =$ $= \frac{45}{140} (20 + 10 + 21 + 16 + 18) = 27,32 \text{ мм}$
$L_1 = 45 \text{ м}$	$\Delta h_1 = 5 \text{ мм}$	
$L_2 = 55 \text{ м}$	$\Delta h_2 = 2 \text{ мм}$	
$L_3 = 65 \text{ м}$	$\Delta h_3 = 0$	
$L_4 = 75 \text{ м}$	$\Delta h_4 = -3 \text{ мм}$	
$L_5 = 85 \text{ м}$	$\Delta h_5 = -2 \text{ мм}$	
$L_6 = 95 \text{ м}$	$\Delta h_6 = -2 \text{ мм}$	
$L_7 = 105 \text{ м}$	$\Delta h_7 = 0$	

Вариант 2

$L_0 = 35 \text{ м}$	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{15}{10} \cdot 100 + \frac{10}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{15}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (150 + 90 + 40 + 0 + 75 + 60) = 103,75 \text{ мм}$ $h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{15}{10} \cdot 40 + \frac{10}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{15}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (60 + 50 + 30 + 135 + 150) = 136,6 \text{ мм}$
$L_1 = 45 \text{ м}$	$\Delta h_1 = 15 \text{ мм}$	
$L_2 = 55 \text{ м}$	$\Delta h_2 = 10 \text{ мм}$	
$L_3 = 65 \text{ м}$	$\Delta h_3 = 5 \text{ мм}$	
$L_4 = 75 \text{ м}$	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85 \text{ м}$	$\Delta h_5 = 0$	
$L_6 = 95 \text{ м}$	$\Delta h_6 = 15 \text{ мм}$	
$L_7 = 105 \text{ м}$	$\Delta h_7 = 15 \text{ мм}$	

Вариант 3

$L_0 = 35 \text{ м}$	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{20}{10} \cdot 100 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (200 + 135 + 40 + 0 + 75 + 0) = 112,5 \text{ мм}$ $h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{20}{10} \cdot 40 + \frac{15}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{15}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (80 + 75 + 30 + 135) = 102,8 \text{ мм}$
$L_1 = 45 \text{ м}$	$\Delta h_1 = 20 \text{ мм}$	
$L_2 = 55 \text{ м}$	$\Delta h_2 = 15 \text{ мм}$	
$L_3 = 65 \text{ м}$	$\Delta h_3 = 5 \text{ мм}$	
$L_4 = 75 \text{ м}$	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85 \text{ м}$	$\Delta h_5 = 0$	
$L_6 = 95 \text{ м}$	$\Delta h_6 = 15 \text{ мм}$	
$L_7 = 105 \text{ м}$	$\Delta h_7 = 0 \text{ мм}$	

Вариант 4

$L_0 = 35 \text{ м}$	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{40}{10} \cdot 100 + \frac{20}{10} \cdot 90 + \frac{5}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 60 + \frac{35}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (400 + 180 + 40 + 0 + 175 + 0) = 198,75 \text{ мм}$
$L_1 = 45 \text{ м}$	$\Delta h_1 = 40 \text{ мм}$	
$L_2 = 55 \text{ м}$	$\Delta h_2 = 20 \text{ мм}$	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{40}{10} \cdot 40 + \frac{20}{10} \cdot 50 + \frac{5}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{0}{10} \cdot 80 + \frac{35}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (160 + 100 + 30 + 315) = 194,46 \text{ мм}$
$L_3 = 65 \text{ м}$	$\Delta h_3 = 5 \text{ мм}$	
$L_4 = 75 \text{ м}$	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85 \text{ м}$	$\Delta h_5 = 0$	
$L_6 = 95 \text{ м}$	$\Delta h_6 = 35 \text{ мм}$	
$L_7 = 105 \text{ м}$	$\Delta h_7 = 0 \text{ мм}$	

Вариант 5

$L_0 = 35 \text{ м}$	$\Delta h_0 = 0$	$h_0 = \frac{35}{140} \left(\frac{70}{10} \cdot 100 + \frac{40}{10} \cdot 90 + \frac{20}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{50}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 50 + \frac{0}{10} \cdot 40 \right) =$ $= \frac{35}{140} (700 + 320 + 160 + 300) = 370,0 \text{ мм}$
$L_1 = 45 \text{ м}$	$\Delta h_1 = 70 \text{ мм}$	
$L_2 = 55 \text{ м}$	$\Delta h_2 = 40 \text{ мм}$	$h_n = \frac{140 - 95}{140} \left(\frac{70}{10} \cdot 40 + \frac{40}{10} \cdot 50 + \frac{20}{10} \cdot 60 + \frac{0}{10} \cdot 70 + \frac{50}{10} \cdot 80 + \frac{0}{10} \cdot 90 + \frac{0}{10} \cdot 100 \right) =$ $= \frac{45}{140} (280 + 200 + 120 + 400) = 321,42 \text{ мм}$
$L_3 = 65 \text{ м}$	$\Delta h_3 = 20 \text{ мм}$	
$L_4 = 75 \text{ м}$	$\Delta h_4 = 0$	
$L_5 = 85 \text{ м}$	$\Delta h_5 = -50 \text{ мм}$	
$L_6 = 95 \text{ м}$	$\Delta h_6 = 0 \text{ мм}$	
$L_7 = 105 \text{ м}$	$\Delta h_7 = 0 \text{ мм}$	

На рис. 5 показаны результаты измерений, зафиксированные на барабане навесного приспособления на участках судна в зоне цилиндрической вставки. За пределами этой зоны корпус не изгибается и его остаточная изогнутая ось прямолинейна. Остаточная изогнутая ось искривлена не на всех участках графика изображенного на миллиметровке барабана, а только там, где в конце участка $\Delta h_i \neq 0$.

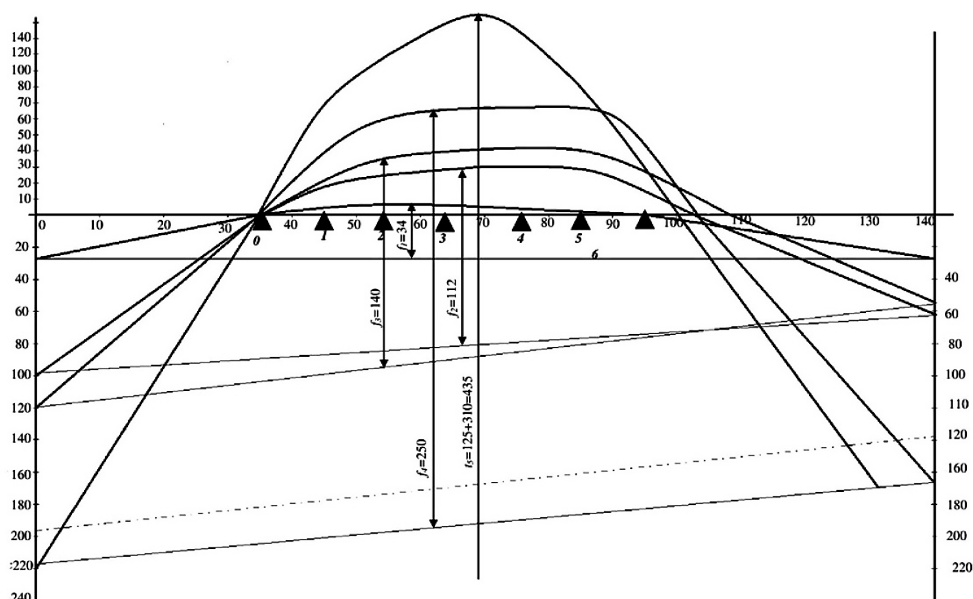


Рис. 5. Результаты измерения остаточной изогнутой оси корпуса

График на барабане показывает значения ординат изогнутой оси от линии, соединяющей начало 1-го участка и конец последнего искривленного участка. Начальная ось для ординат будет проходить по линии, соединяющей на графике две точки, у которых значения ординат h_0 и h_n вычислены по формулам (13) и (14) соответственно. Таким образом, на графике, снятом с барабана приспособления, зафиксированы значения максимального перегиба (прогиба) также вне деформированного участка, кривизна которых определяется по формуле (12). Максимальное значение ординаты изогнутой оси можно определить по формуле (5), используя для этого значение h , приведенное на рис. 5.

Предлагаемые способ и инструментарий для измерения позволяют достаточно точно, просто и наглядно определять параметры остаточной изогнутой оси корпуса, необходимые для оценки его технического состояния и последующего устранения общей остаточной деформации при ремонте.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

В результате выполненного исследования получен простой, удобный и достоверный способ определения параметров деформированной оси корпуса при общем остаточном перегибе или прогибе. Точное определение параметров общих остаточных деформаций корпуса является актуальной задачей в особенности для крупных (длиной 100 м и более) речных судов и судов смешенного *река-море* плавания, остаточные толщины крайних связей корпуса которых существенно меньше, чем у аналогичных морских судов. Такие суда имеют значительный средний возраст, что приводит довольно часто к возникновению общих остаточных деформаций. Предложенный инструментарий позволяет измерять максимальные значения стрелок перегиба (прогиба) как в целях контроля уровня общей прочности, так и с целью разработки технологического процесса устранения данного дефекта.

Изучением вопросов измерения параметров остаточного перегиба или прогиба корпуса в целом, занимались ведущие специалисты отрасли: С. Н. Гирин, Т. А. Кузнецова [12], Т. А. Исаева [13], Г. В. Бойцов [14], П. А. Бимбереков [15], Е. Г. Бурмистров и А. М. Уласов [16]. О необходимости нормирования значений стрелок перегиба (прогиба), в соответствии с Правилами РКО, свидетельствуют результаты исследования, выполненного С. Н. Гириным в рамках отчета о НИР [17].

Отличием настоящего исследования от работ других авторов является доступный способ измерения остаточных стрелок перегиба корпуса, предложенное приспособление для фиксации отклонений фактического положения оси корпуса от исходного (недеформированного) положения, а также использование приведенных в работе математических зависимостей для исключения упругой составляющей изгиба и расчета параметров деформированной оси корпуса.

Заключение (Conclusion)

Вопросами измерения, оценки и устранения имеющихся в корпусе судна общих остаточных деформаций специалисты ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова занимаются достаточно давно. Опыт изучения данного вопроса позволил:

- создать приспособление для фиксации отклонений настила палубы деформированного корпуса судна от его исходного положения;
- разработать методику вычисления точных координат фактического положения оси корпуса относительно исходного (недеформированного) положения;
- обосновать необходимое число измеряемых участков в зависимости от длины корпуса судна.

Доступность и простота предложенного способа определения параметров общих остаточных деформаций корпуса судна по результатам измерений подтверждена выполненным контрольным примером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карклина Т. О. Технологический методы стабилизации метрологических характеристик танкеров: диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук; специальность: 05.08.04: Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Т. О. Карклина. — Л.: СПГУВК, 1991. — 155 с.

2. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128. — EDN NCDTCTF.
3. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533. — EDN TVJHJNJ.
4. Карклина Т. О. Повышение точности измерения остаточного перегиба корпуса судна / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4(32). — С. 109–118. — EDN UDJUUR.
5. Бойцов Г. В. Анализ возможных причин появления общих остаточных деформаций корпуса: Отчет по договору № ЦРП-05–31–07 / Руковод. д-р техн. наук, проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 48 с.
6. Бойцов Г. В. Анализ и оценка остаточных деформаций корпусов судов смешанного плавания при пониженных запасах устойчивости их продольного набора / Г. В. Бойцов, А. В. Александров, О. С. Анкудинов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А. Н. Крылова. — 2006. — № 28(312). — С. 16–23. — EDN JKGXDN.
7. Бойцов Г. В. Справочник по строительной механике корабля / Г. В. Бойцов, О. М. Палий, В. А. Постнов, В. С. Чувиковский — Л.: Судостроение, 1982. — 320 с.
8. Патент № 2435149 С1, Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения остаточного продольного изгиба корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; заяв. «Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций». — № 2010106960/28; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 12 с. — EDN ANEVFR.
9. Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов / ФГОУ ВПО СПГУВК / Рук. С. О. Барышников, отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов. Согласов. ФГУ Российский Речной Регистр. Письмо 07–06–450 от 21.02.2012. — СПб., 2011. — 201 с.
10. Барышников С. О. Научные основы технологии восстановления общей прочности корпуса судна при ремонте / дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.04: Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства / Сергей Олегович Барышников. — Астрахань: АГТУ, 2011. — 421 с. — EDN SUNSSH.
11. Барышников С. О. Надежность механизмов и корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погодаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.
12. Гири́н С. Н. Упругопластическое деформирование корпуса судна при нагрузках, близких к предельным / С. Н. Гири́н, Т. А. Кузнецова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2 (Спецвыпуск). — С. 33–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40. — EDN YQZQIN.
13. Гири́н С. Н. Предельное состояние сжато-изогнутого ребра судового корпуса / Гири́н С. Н., Исаева Т. А. // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 1 (Спецвыпуск). — С. 24–29. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-24-27. — EDN REYSLZ.
14. Бойцов Г. В. Разработка предложений и расчетных зависимостей для учета остаточных прогибов (перегибов) при расчетах общей прочности, а также мероприятий, ограничивающих их появление: отчет по договору № ЦРП-05-31-07 (этап 2). / рук. д. т.н., проф. Г. В. Бойцов. — СПб., 2005. — 56 с.
15. Пат. № 2298162 С1 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ определения общих остаточных деформаций корпусов транспортных и / или стояночных средств / П. А. Бимбереков; Заяв. и патентообл. П. А. Бимбереков — № 2006107268/28; заявл. 09.03.2006; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12. — 6 с. — EDN CTWSDN.
16. Уласов А. М. Способ определения общих остаточных деформаций корпусов транспортных и / или стояночных средств д вероятностной оценки остаточного ресурса корпуса судна и его элементов / А. М. Уласов, Е. Г. Бурмистров // Речной транспорт (XXI век). — 2021. — № 2. — С. 44–48.
17. Гири́н С. Н. Нормирование остаточных перегибов корпусов судов. Обоснование ограничений, вводимых Речным Регистром на величину максимальных остаточных деформаций общего перегиба корпусов судов: отчет по договору № 143/17/31/09/1701/ВГУВТ / Руковод. канд. техн. наук, проф. С. Н. Гири́н. — Н. Новгород, 2018. — 79 с.

REFERENCES

1. Karklina, T. O. Technological methods for stabilizing the metrological characteristics of tankers. PhD diss. SPb: SPGUVK. 1991.

2. Baryshnikov, S. O., Karklina, T. O. "Genera residual deformations of ship hulls." *Vestnik INZHEKONA. Seria: Tekhnicheskiye nauki* 8 (2010): 124–128.
3. Baryshnikov, S. O., Karklina, T. O., Chistov, V. B. "Reliability of ship hulls with general residual deformations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
4. Karklina, T. O., Pavlov, A. V. and Chistov, V. B. "Improving the accuracy of measuring the residual bend of the ship's hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 4(32) (2015): 109–118.
5. Boytsov G. V. "Analysis of possible causes of the appearance of general residual deformations of the hull" // *Otchet po dogovoru № TSRP-05–31–07/ ruk. d. t.n., professor G. V. Boytsov.* — SPb. 2005. — 48 s.
6. Boytsov, G.V., Aleksandrov, A.V., Ankudinov, O.S. "Analysis and assessment of residual deformations of the hulls of mixed navigation vessels with reduced stability margins of their longitudinal framing." *Trudy tsentral'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta im. Akademika A. N. Krylova* 28 (2006): 16–23.
7. Boytsov, G. V., Paliy O. M., Postnov, V. A., Chuvikovskiy, V. S. *Handbook of ship structural mechanics.* Leningrad: *Izd-vo Sudostroyeniye.* 1982.
8. Baryshnikov, S. O., Karklina, T.O., Chistov, V.B. *RU 2 435 149 C1, IPC G 01 M 5/60.* A method for determining the residual total bending of a ship's hull. Russian Federation, assignee. Publ. 27 October 2011.
9. *Technological instruction for eliminating residual bending of ship hull's.* / FGOU VPO SPGUVK / ruk. S. O. Baryshnikov, otv. isp.: T. O. Karklina, V. B. Chistov. Soglasov. FGU Rossiyskiy Rachnoy Registr. Pis'mo 07–06–450 ot 21.02.2012. — SPb. 2011. — 201 s.
10. Baryshnikov, S. O. Scientific basis of technology for restoring the overall strength of a ship's hull during repairs. Grand PhD diss. Astrakhan': AGTU, 2011.
11. Baryshnikov, S. O., Pogodayev, L. I., Chistov, V. B. *Reliability of mechanisms and ship hulls.* SPb.: *Izd-vo GUMRF im. Admiral S. O. Makarova.* 2018.
12. Girin, S. N., Kuznetsova, T. A. "Elastoplastic deformation of the ship's hull under loads close to the maximum." *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* Spetsvypusk 2. (2018): 33–40. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-33-40.
13. Girin, S. N., Isaeva, T. A. "Limit state of a compressed-bent rib of a ship's hull." *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* Spetsvypusk 1. (2020): 24–29. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-24-27.
14. *Boytsov, G. V.* "Development of proposals and design dependencies to take into account residual deflections (bend) when calculating the overall strength, as well as measures to limit their occurrence" / Contract report № TSRP-05–31–07 (etap2). ruk. d. t.n., professor G. V. Boytsov. — SPb, 2005. — 56 s.
15. Bimberekov, P. A. *RU 2 298 162 C1, IPC G 01 M 5/00.* Method for determining the general residual deformations of the hulls of transport and/or parking vessels Russian Federation, assignee. Publ. 27 April 2007.
16. Ulasov, A. M. and Burmistrov, E.G. "Method of probabilistic assessment of the residual life of a ship's hull and it's elements." *Rechnoy transport (XXI vek)* 2 (2021): 44–48.
17. Girin, S. N. "Standartization of residual bends of ship hulls. Justification of the restrictions introduced by the River Register on the value of maximum residual deformations of the general bending of ship hulls" / Contract report № 143/17/31/09/1701/VGUVT ruk. D.t.n., prof. S. N. Girin. — N.Novgorod, 2018. — 79 s.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rector@gumrf.ru
Красюк Алла Борисовна —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergei O. —
Dr. of Technical Sciences, professor, rector
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rector@gumrf.ru
Krasiuk, Alla B. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, kaf_mnt@gumrf.ru

Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

Chistov, Valentin B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chistovvb@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 августа 2024 г.

Received: August 15, 2024.