

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 539.04

Т. О. Карклина,
канд. техн. наук;

А. В. Павлов,
асп.;

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ПЕРЕГИБА КОРПУСА СУДНА

ENHANCCE THE ACCURACY OF RESIDUAL DEFLECTIO HULL

В связи со старением флота, общие остаточные деформации (прогиб, перегиб) все чаще встречаются на судах класса «река – море» плавания. Главной задачей является определение ординат остаточной стрелки перегиба. Статья посвящена проблеме измерения остаточного общего перегиба корпуса судна. В статье приведены различные методики вычисления ординат изогнутой оси корпуса судна, а также примеры остаточных изогнутых осей судов типа «Волгонефть» и «Волго-Дон» с общими остаточными деформациями. На примере судов типа «Волгонефть» приведен сравнительный анализ остаточных изогнутых осей, вычисленных по традиционной методике и по патентованной методике д-ра техн. наук, проф. С.О. Барышникова. На основании выполненного анализа выбран наиболее эффективный способ определения ординат остаточной стрелки перегиба судна и предложен способ повышения точности измерения ординат изогнутой оси.

Total residual strains (deflection, inflection) are increasingly common on river-sea navigation vessels of. The main objective is to determine the ordinate of the total residual inflection. The article is devoted to the problem of measuring ordinate for the total residual inflection of the ship hull. The article presents different methods of calculating the total residual hull inflection, as well as examples of residual inflection of hulls of «Volgoneft» and «Volga-Don» ship types, calculated according to these techniques. By way of example of the «Volgoneft» vessel type comparative an analysis of residual curved axes was done based on calculations according to the traditional method and the patented method by S.O. Baryshnikov. And on the basis of the analysis we selected the most effective way to determine the residual ship hull inflections and a more effective method for improving the accuracy of measurements of residual total inflection ordinate was proposed.

Ключевые слова: остаточные деформации, остаточная изогнутая ось, корпус судна, изгибающий момент, кривизна.

Key words: residual strains, residual curved axis, hull, bending moment, curvature.

В НАСТОЯЩЕЕ время все чаще стали встречаться суда «река – море» плавания с общими остаточными деформациями. Причин возникновения такого дефекта несколько [1], [2]. К подобному роду повреждений может привести неправильная технология ремонта, чрезмерные нагрузки при эксплуатации и погрешности спускового устройства (слипа) при спуске на воду. Общие остаточные деформации корпуса вызывают появление после ремонта в крайних связях эквивалентного бруса остаточных напряжений, которые могут вызвать снижение коэффициента запаса на выносливость [3] и появление поправок к редуцированным коэффициентам продольных ребер жесткости [4]. В [5], на примере теплохода типа «Невский», был выполнен расчет возможных остаточных напряжений при различных способах ремонта. На основании полученных результатов вычислений видно, что остаточные напряжения при всех видах ремонта будут существенными.

Все эти обстоятельства являются основными причинами, побуждающими к тому, чтобы остаточный общий перегиб учитывался при оценке технического состояния корпуса судна и разработке технологических процессов его ремонта.

До недавнего времени на практике определение остаточной стрелки прогиба включало измерение ординаты изогнутой оси под нагрузкой и вычитание из нее упругого прогиба от этой нагрузки:

$$Y_{\text{ост}} = Y_{\text{изм}} - Y_{\text{упр}} - Y_t, \quad (1)$$

где $Y_{\text{изм}}$ — измеренный прогиб; $Y_{\text{упр}}$ — упругий прогиб; Y_t — прогиб от неравномерного нагрева по высоте корпуса.

Измерения прогиба корпуса на плаву можно производить с помощью геодезических приборов по специальным методикам или с использованием аппроксимированной параболы второй степени изогнутой оси по результатам измерения трех осадок на корпусе [6]

$$Y_{\text{изм}} = px^2 + qx + h. \quad (2)$$

Здесь x — координата по длине корпуса; p, q, h — постоянные, которые можно определить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{T_{\otimes}L_3 - T_{\text{Н}}L_2 - T_{\text{К}}(L_3 - L_2)}{L_2L_3(L_2 - L_3)} \\ q &= \frac{T_{\otimes}L_3^2 - T_{\text{Н}}L_2^2 - T_{\text{К}}(L_3^2 - L_2^2)}{L_2L_3(L_2 - L_3)} \\ h &= T_{\text{К}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $T_{\otimes}, T_{\text{Н}}, T_{\text{К}}$ — осадка на миделе, носом и кормой соответственно; L_2, L_3 — места расположения измерения осадки по длине судна на миделе и корме соответственно.

Сложность выполнения данной задачи заключается в том, что необходимо вычислять упругий прогиб методами строительной механики корабля [7], которые не учитывают изменение момента инерции поперечного сечения корпуса по длине вследствие износа, приобретаемого во время эксплуатации. По этой причине наличие этого дефекта не учитывалось раньше при оценке технического состояния корпуса судна, если отсутствовали признаки наметившего перелома.

Доктором технических наук, профессором С. О. Барышниковым [8] был запатентован способ определения ординат остаточной изогнутой оси корпуса. Формула для расчета имеет вид

$$y_{\text{ост}}(x) = \frac{\sum_i^n c_i l_i (L - L_i)}{L} x - \sum \left(\frac{c_i \left(x - \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{x \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)} - \frac{c_i \left(x - \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right) \right)^2}{2} \Big|_{x \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)} \right), \quad (4)$$

где $y_{\text{ост}}(x)$ — ордината изогнутой оси корпуса; L_i — расстояние от кормового перпендикуляра на 20-м практическом шпангоуте до середины участка с заданной кривизной; l_i — длина участка с заданной кривизной; c_i — кривизна на i -м участке, определяемая по формуле $c_i = \frac{8f_i}{l_i^2}$; f_i — высота хорды на участке с постоянной кривизной, определяемая по результатам измерений отклонений от горизонтальной плоскости; L — длина судна между перпендикулярами; $x \geq \left(L_i - \frac{l_i}{2} \right)$ и $x \geq \left(L_i + \frac{l_i}{2} \right)$ — показатели, указывающие на то, что слагаемые учитываются только в том случае, когда выражение в скобках, возводимое в квадрат, имеет положительное значение.

При выводе зависимости (4) принимались следующие допущения:

1) корпус судна имеет остаточную кривизну только на тех участках, где произошли пластические деформации;

2) участки для измерения кривизны располагаются в средней части корпуса судна;
3) считается, что кривизна корпуса, измеренная на палубе или днище, совпадает с кривизной нейтрального слоя;

4) для определения остаточного прогиба (перегиба) используется графоаналитический способ определения перегиба балок, при котором прогиб равен изгибающему моменту фиктивной балки, нагруженной фиктивной распределенной нагрузкой интенсивностью, равной кривизне балки.

Первое допущение можно даже не считать таковым. Из определения остаточной деформации следует, что при оценке на объект не должна действовать внешняя нагрузка, и, значит, на участках, где не произошли пластические деформации, кривизна меняться не будет.

Второе допущение в части расположения измеряемых углов можно считать приемлемым, так как в средней части корпуса действуют наибольшие изгибающие моменты в эксплуатации и поэтому здесь следует ожидать появления остаточной кривизны.

Третье допущение может дать погрешность в определении кривизны на измеряемом участке, не превышающую 0,5 %, такая же погрешность будет для рассчитанных стрелок прогиба корпуса.

При измерении кривизны на участках судно находится под нагрузкой (действуют силы веса, силы поддержания), поэтому остаточная кривизна на участке должна быть определена по формуле

$$c_i^{\text{ост}} = c_i^{\text{изм}} - c_i^{\text{упр}}, \quad (5)$$

где $c_i^{\text{изм}}$ — кривизна, вычисляемая по формуле $c_i = \frac{8f_i}{l_i^2}$ после измерения стрелки прогиба на участке длиной l или по разности отклонений от горизонтальной плоскости в середине или по краям участка; $c_i^{\text{упр}}$ — кривизна, созданная изгибающим моментом от внешней нагрузки на данном участке, определяемая по формуле

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{M}{EJ}, \quad (6)$$

где M — максимальный изгибающий момент от внешней нагрузки, действующий на участке, где выполняются измерения; E — модуль нормальной упругости для стали; J — момент инерции поперечного сечения корпуса на участке, где выполняются измерения.

Для судов типа «Волгонефть», у которых максимальный изгибающий момент на тихой воде $M = 60000 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а момент инерции $J = 3 \text{ м}^4$, кривизна, созданная изгибающим моментом, будет равна

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{60000 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}.$$

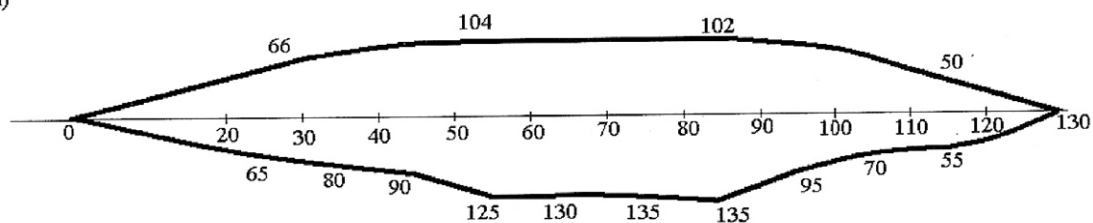
Для судов типа «Волго-Дон», у которых максимальный изгибающий момент на тихой воде $M = 70000 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а момент инерции $J = 3,5 \text{ м}^4$, кривизна, созданная изгибающим моментом, будет равна

$$c_i^{\text{упр}} = \frac{70000 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 3,5 \cdot 10^6} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}.$$

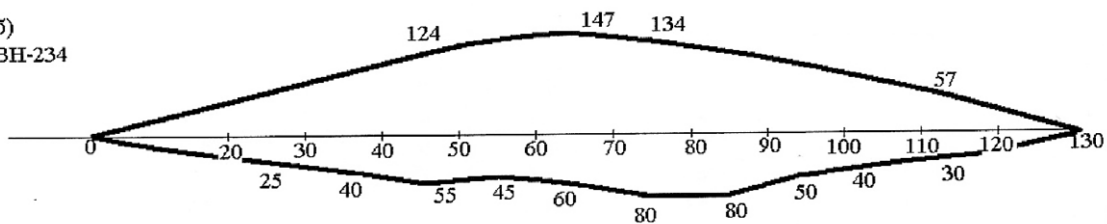
Статистических данных об общих остаточных деформациях крайне мало, что не позволяет выявить их зависимость от времени, места эксплуатации, выполненных ремонтов и грузовых операций.

Первые сведения об общих остаточных деформациях содержатся в работах В. Д. Дринкова и относятся к нефтеналивным баржам. Несколько позднее в своих трудах И. А. Гунин представил данные по сухогрузным судам. Общие остаточные деформации судов типа «Волгонефть» исследовались в трудах Т. О. Карклиной. Перечисленные работы были опубликованы более 25 лет назад. Сейчас данные об остаточных изогнутых осях корпусов судов, полученные за последние пятьдесят лет, можно найти в [3], [8], [9]. В публикации [3] представлены результаты расчета остаточного общего прогиба по формуле (1) и результаты измерений ординат остаточной изогнутой оси танкеров типа «Волгонефть». На рис. 1 приведены результаты этих расчетов.

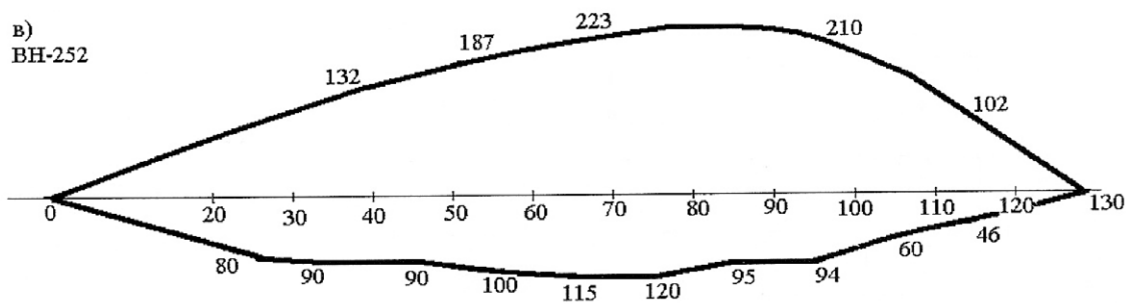
а)



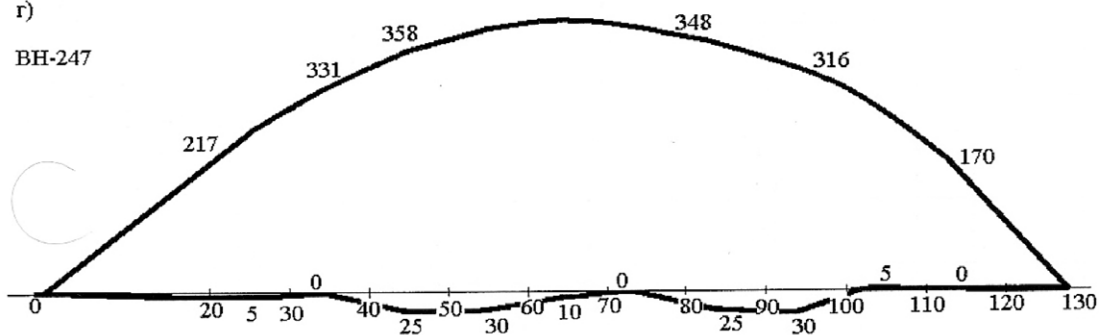
б)
ВН-234



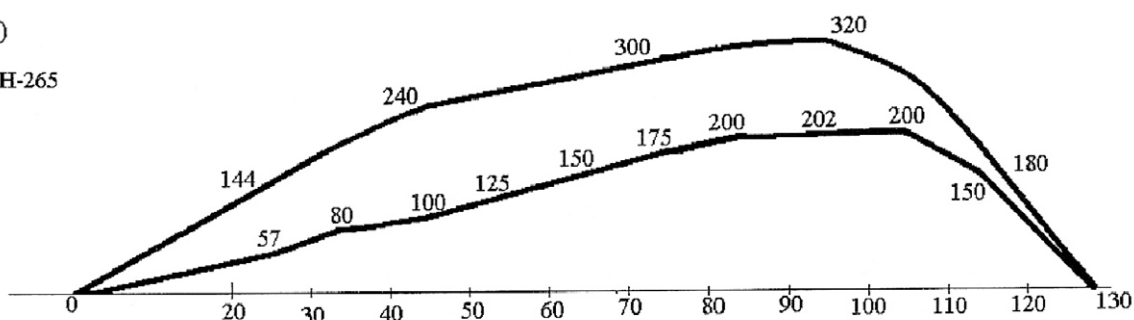
в)
ВН-252



г)
ВН-247



д)
ВН-265



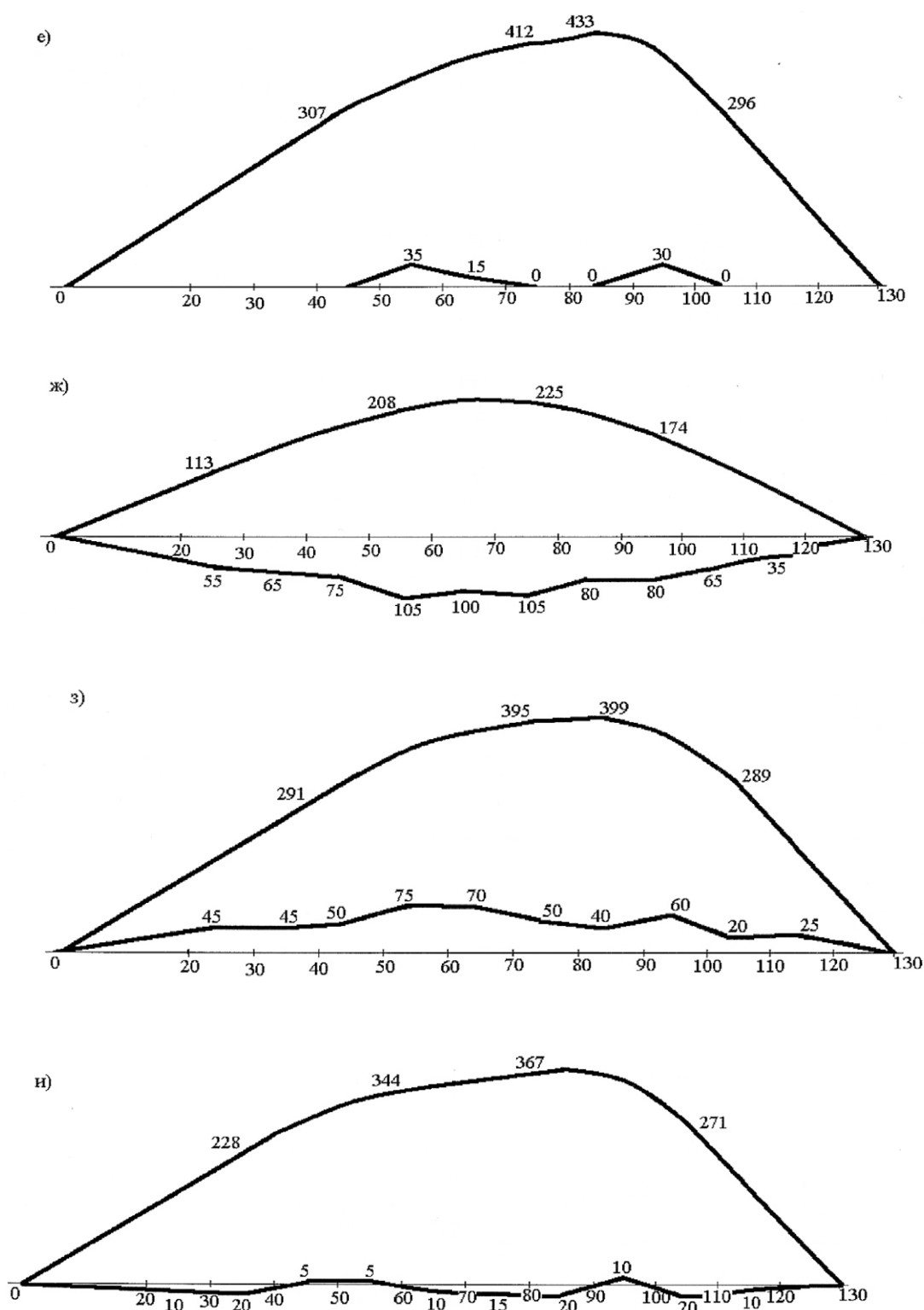


Рис. 1. Ординаты изогнутой оси танкера типа «Волгонефть», в грузу и остаточный:
ВН-251 (а); ВН-234 (б); ВН-252 (в); ВН-247 (г); ВН-265 (д); ВН-130 (е); ВН-140 (ж); ВН-168 (з); ВН-169 (и)

Данные об измеренных ординатах остаточных изогнутых осей пополняются. Нами были получены и обработаны данные по четырем судам типа «Волгонефть». Результаты расчетов ординат остаточной изогнутой оси по патентованному и традиционному методам были сопоставлены и представлены на рис. 2.

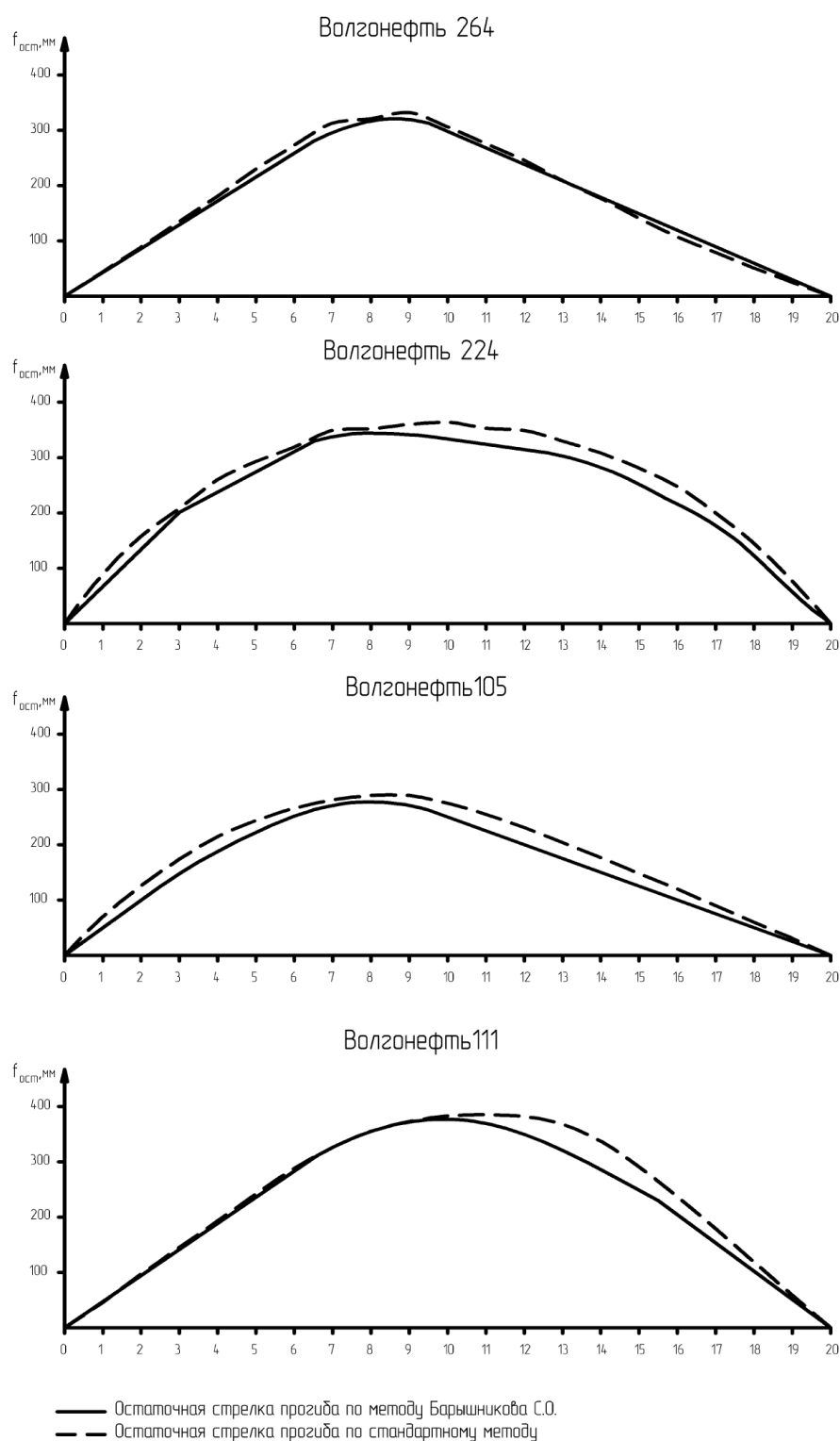


Рис. 2. Результаты расчетов ординат остаточной изогнутой оси по патентованному и традиционному методам для судов типа «Волgoneфть»

В ОАО «ИЦС» при выполнении работ по правке корпусов судов типа «Волго-Дон» была использована патентованная методика для вычисления остаточной изогнутой оси. В [10] представлен результат расчета изогнутой оси судна типа «Волго-Дон» по методике С. О. Барышникова. Результаты приведены на рис. 3.

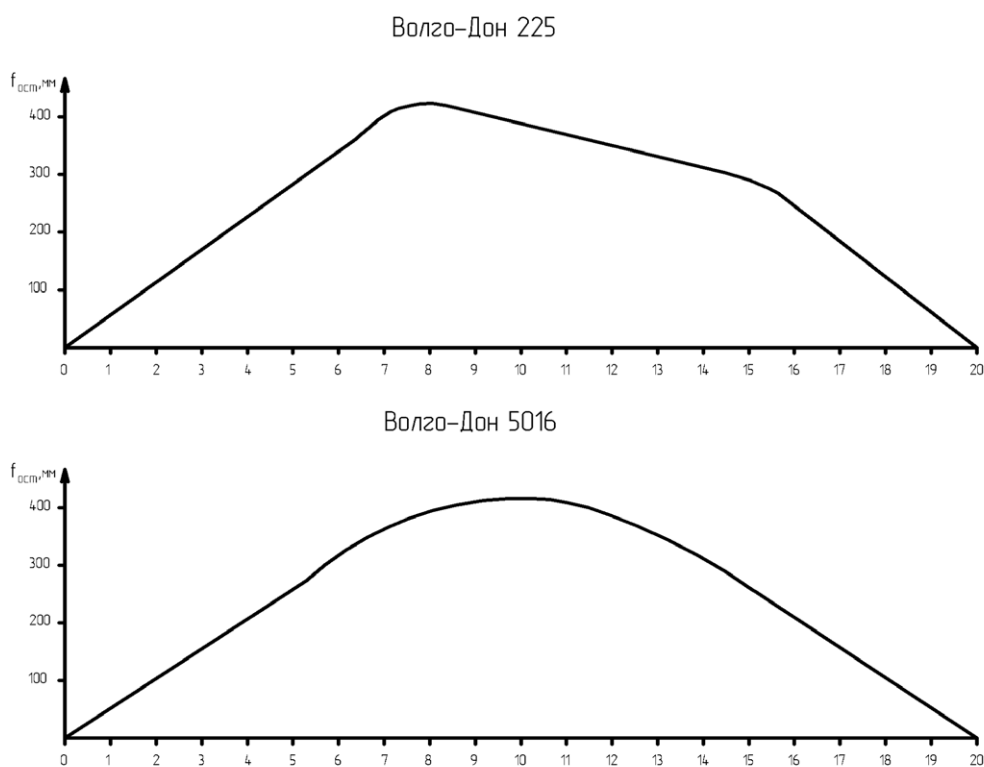


Рис. 3. Остаточная изогнутая ось для судов типа «Волго-Дон»

В результате расчетов остаточных изогнутых осей были получены значения кривизны на различных участках, которые представлены в таблице:

Значение кривизны в зависимости от длины расчетного участка

Название судна	Длина участка l_p , м	Измеренная стрелка прогиба f_p , м	Кривизна c_p , 1/м
Волгонефть 264	12,86	$21,05 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
	12,86	$14,73 \cdot 10^{-3}$	$0,71 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 224	12,86	$14,20 \cdot 10^{-3}$	$0,69 \cdot 10^{-3}$
	25,72	$24,99 \cdot 10^{-3}$	$0,30 \cdot 10^{-3}$
	18,30	$18,30 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 105	30,00	$25,20 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$
	15,00	$8,70 \cdot 10^{-3}$	$0,31 \cdot 10^{-3}$
Волгонефть 111	20,00	$12,00 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$
	12,86	$7,20 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$
Волго-Дон 5016	13,80	$3,50 \cdot 10^{-3}$	$0,147 \cdot 10^{-3}$
	16,20	$4,50 \cdot 10^{-3}$	$0,137 \cdot 10^{-3}$
	20,40	$24,00 \cdot 10^{-3}$	$0,461 \cdot 10^{-3}$
	15,60	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$0,108 \cdot 10^{-3}$
Волго-Дон 225	7,20	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$0,463 \cdot 10^{-3}$
	7,20	$7,00 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$
	7,20	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$

Проанализировав результаты расчета остаточного общего перегиба и кривизны, представленных на рис. 1 – 3 и в таблице, следует отметить, что точность определения остаточного общего перегиба в значительной степени зависит от учета упругой составляющей. Наименьшая кривизна изогнутой оси корпуса в деформированной части будет в том случае, когда деформированный участок распространяется на всю среднюю часть, как показано на рис. 4, а.

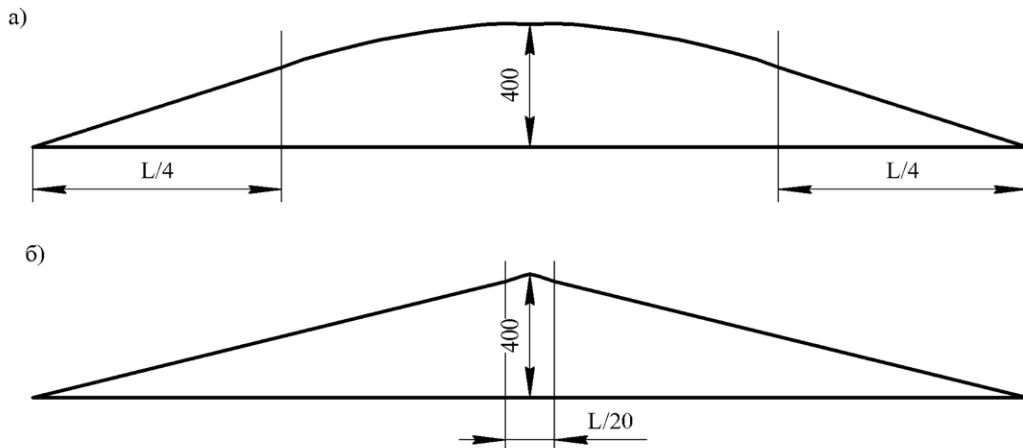


Рис. 4. Кривизна изогнутой оси корпуса в деформированной части: деформированный участок корпуса судна расположен в средней части (а); деформированный участок расположен по длине $L/20$ (б)

Изогнутая ось в этом случае определяется уравнением

$$y(x) = c_i \cdot \frac{L}{2} \cdot x - \left(\frac{c_i \cdot \left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} \Big|_{x \geq \frac{L}{4}} - \frac{c_i \cdot \left(x + \frac{3L}{4}\right)^2}{2} \Big|_{x \geq \frac{3L}{4}} \right), \quad (7)$$

где первое слагаемое в скобках учитывается при $x \geq \frac{L}{4}$, а второе слагаемое — при $x \geq \frac{3L}{4}$.

Для стрелки прогиба на миделе после преобразования зависимости (7) получим

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{3}{32} c_i L^2. \quad (8)$$

Зададимся значением максимальной стрелки перегиба судна типа «Волгофнеть»

$y\left(\frac{L}{2}\right) = 0,4$ м. Кривизна в средней части корпуса судна длиной 140 м в этом случае

$$c_{\text{изм}} = 2,18 \cdot 10^{-4}, 1/\text{м}.$$

Ранее было определено, что кривизна от упругого изгиба для судна типа «Волгонефть» $c_{\text{упр}} = 1 \cdot 10^{-4} 1/\text{м}$. Тогда остаточная кривизна будет равна

$$c_{\text{ост}} = c_{\text{изм}} - c_{\text{упр}} = 1,18 \cdot 10^{-4}, 1/\text{м}. \quad (9)$$

Подставив значение остаточной кривизны в формулу (8), получим величину остаточной стрелки прогиба на миделе:

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{3}{32} c_i L^2 = 0,217 \text{ м}.$$

Доля максимального остаточного перегиба от измеренного (0,4 м) при форме изогнутой оси, показанной на рис. 4, а, составляет всего 0,54 и будет уменьшаться по мере приближения максимального измеренного к максимальному упругому.

На практике, на изогнутой оси корпуса значительная кривизна концентрируется лишь на одном – трех небольших по длине участках, существенно меньших, чем длина средней части (рис. 4, б). Если такой слом расположен на миделе, то из зависимости (7) получим

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{cl}{2}\left(L - \frac{1}{4}\right). \quad (10)$$

Если принять остаточную кривизну, распространившуюся только на участке $l = \frac{L}{20}$, значение максимальной остаточной стрелки прогиба получим по формуле

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{79}{3200}c_i L^2 = 0,0247c_i L^2. \quad (11)$$

При максимальной стрелке перегиба 0,4 м на участке $\frac{1}{20}L$ измеренная кривизна будет равна $c_{\text{изм}} = 8,27 \cdot 10^{-4}$ 1/м, а остаточная на этом участке $c_{\text{ост}} = 7,27 \cdot 10^{-4}$ 1/м. Максимальная остаточная стрелка перегиба после подстановки значений в формулу (12)

$$y_{\text{ост}}\left(\frac{L}{2}\right) = 0,352 \text{ м.}$$

Доля максимального остаточного перегиба от измеренного (0,4 м) при форме изогнутой оси, показанной на рис. 4, б, составляет 0,88 и будет уменьшаться по мере приближения максимального измеренного к максимальному упругому.

На рис. 5 представлен график зависимости длины участка от отношения максимально измеренной координаты остаточной изогнутой оси к максимальной координате остаточной изогнутой оси для судов типа «Волгонефть».

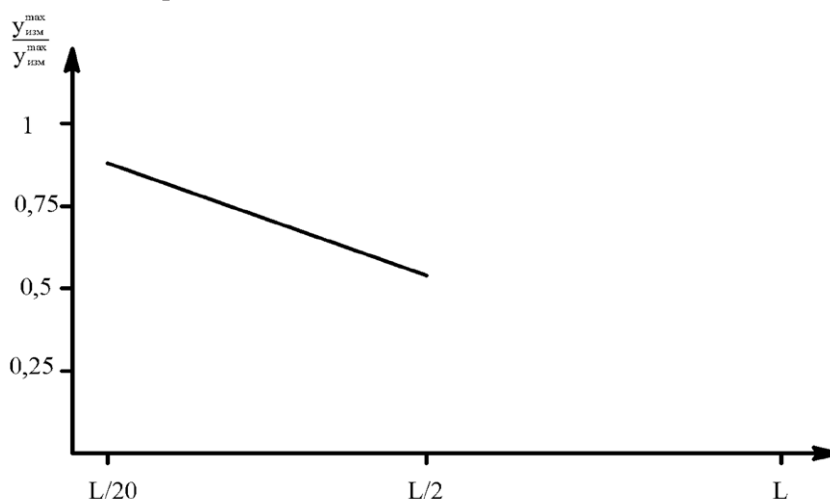


Рис. 5. Зависимость длины участка l от отношения $\frac{y_{\text{ост}}^{\text{max}}}{y_{\text{изм}}^{\text{max}}}$

Определение кривизны на отдельных участках выполняется на основании отклонений от горизонтальной плоскости по высоте хорды на заданном участке. Высота хорды определяется по формуле

$$f = y(L_i) - \frac{y\left(L_i + \frac{l}{2}\right) - y\left(L_i - \frac{l}{2}\right)}{2}. \quad (12)$$

Высота хорды в случае, представленном на рис. 4, б, равна 5,1 мм, а высота хорды при упругом изгибе равна 0,61 мм, последнее значение находится в пределах точности измерений отклонений от горизонтальной плоскости.

Таким образом, после проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– при вычислении остаточной изогнутой оси по патентованной методике результат получается более точным, чем по традиционному методу. Это достигается тем, что при вычислении не требуется знать изменение момента инерции корпуса судна по длине из-за износа;

– по результатам расчетов по патентованной методике сразу видно, на каких участках корпуса судна наибольшая кривизна и где необходимо будет выполнить частичный разрез для правки корпуса;

– кривизна корпуса судна зависит от длины участка. Если длина участка составляет менее $\frac{L}{10}$, то остаточная кривизна равна измеренной. Если длина участка более $\frac{L}{10}$, то остаточная кривизна будет определяться как разность значений измеренной и упругой кривизны.

Список литературы

1. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Вестник ИНЖЭКОНа. Сер.: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 124–128.
2. 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. Андудинов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2006. — № 28. — С. 16–23.
3. Барышников С. О. Устранение остаточного перегиба корпусов судов / С. О. Барышников. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2011.
4. Павлов А. В. Влияние остаточных напряжений на редуцированные коэффициенты ребер жесткости / А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 60–64.
5. Павлов А. В. Остаточные напряжения в корпусе судна теплохода «Невский» при ремонте / А. В. Павлов // Материалы VI Межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 14 мая 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2015. — С. 151–155.
6. Барышников С. О. Общие остаточные деформации корпусов судов / С. О. Барышников, Т. О. Карклина // Речной транспорт XXI век. — 2010. — № 6. — С. 87–91.
7. Давыдов В. В. Справочник по прочности судов внутреннего плавания / В. В. Давыдов, Н. В. Матесс, И. Н. Сиверцев. — М.: Речной транспорт, 1958.
8. Барышников С. О. Определение остаточного общего прогиба (перегиба) корпуса судна / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Морской вестник. — 2011. — № 1. — С. 109–112.
9. Егоров Г. В. Анализ общих остаточных деформаций корпусов судов и обоснование допускаемой их величины / Г. В. Егоров, Фам Ван Туан // 36 науч. прац. НУК. — 2009. — № 5 (428). — С. 8–17.
10. Ефименков Ю. И. Устранение остаточного перегиба корпуса судна теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Труды ЦНИИМФ. — 2015. — С. 25–32.