

# СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

УДК 629.12.011.82.+629.12.011.004.67

*П. А. Бимбереков*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДКРЕПЛЕНИЙ КОРПУСОВ СУДОВ НА ОСНОВЕ ПРИВЕДЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ ОБЩИХ ПРОДОЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

*P. A. Bimberekov*

## PARAMETERS DETERMINATION OF HULLS STRENGTHENING ON THE BASE OF THE ADJUSTED VALUE OF COMMON RESIDUAL LONGITUDINAL STRAINS

Рассматривается проблема подкрепления корпусов судов, имеющих как местные, так и общие остаточные деформации, а также износы корпусных конструкций. Определяется действительное значение общих продольных остаточных деформаций с учетом значения упругих температурных деформаций и упругих деформаций от наличия общих остаточных деформаций. Определение параметров подкреплений сводится к схеме нивелирования влияния приведенных общих остаточных деформаций (которые, в частности, могут реально отсутствовать).

**Ключевые слова:** общие продольные остаточные деформации, прочность корпусов судов, подкрепление корпусов судов.

The problem of strengthening of ships hulls having both local and common residual strains and wears of hull constructions is considered in the paper. The real value of common residual longitudinal strains is determined taking into account the value of elastic temperature deformations and elastic deformations, caused by common residual deformations. The determination of strengthening parameters came to the grading scheme of the influence of mentioned common residual deformations (which really could miss).

**Key words:** total residual longitudinal deformation, hulls strength, hulls strengthening.

В [1–3] нами описан вариант уточненного определения и нормирования значений общих остаточных деформаций, учитывающий как собственно наличие таких деформаций, так и деформаций от температурных градиентов (например, разницы значений температуры между палубой и днищем корпуса судна).

Задача подкрепления корпусов разбивается на следующие этапы:

- определение характеристик общей прочности корпусов: моментов инерции и сопротивления поперечного сечения, остаточных стрелок общей продольной деформации в выбранных сечениях корпуса судна, а также местных остаточных деформаций и износов связей;
- определение предельно допустимого значения общей продольной деформации корпуса как в настоящем моменте хода эксплуатации, так и в прогнозируемых времени и условиях эксплуатации, с определенными и (или) прогнозируемыми характеристиками общей продольной прочности;
- определение параметров подкреплений на основе разницы между допускаемым для данного корпуса значением общих продольных остаточных деформаций и действительным их значением.

*Определение характеристик общей прочности корпуса* на определенный срок службы производится на основе его фактической дефектации и (или) на основе статистических данных по ряду судов с планированием на перспективу. Возможно определение характеристик общей прочности корпуса на основе измерения его гибкой линии при известных вариантах загрузки. Так, текущее значение момента сопротивления сечения корпуса судна,  $W$ , в его выбранных сечениях может определяться известным образом из эксперимента по его гибкой линии и относительным деформациям палубы и днища при типовых нагрузках корпуса. Иначе значение  $W$  рассчитывается по значениям остаточных толщин связей, определяемых, в свою очередь, или по результатам дефектации корпуса, или расчетом по статистическим значениям скорости изнаши-

вания связей корпуса. Величина остаточной стрелки общей продольной деформации определяется экспериментально-расчетным путем [1, 2], измерением гибкой линии корпуса и удалением из ее значений упругой составляющей. По значению  $W$  и нормируемому значению допускаемых напряжений от общего изгиба  $\sigma_0$  определяется значение предельно допускаемого изгибающего момента от общего изгиба по выражению  $[M_0] = W\sigma_0$ .

Определение величины предельно допустимого изгибающего момента от наличия общих остаточных деформаций  $[M_{\text{ост}}]$ , действующего на корпус, возможно, в частности, и реально отсутствующего, при знании величины  $[M_0]$  и значения суммарного изгибающего момента от различных нагрузок  $\sum M$  без учета в нем значения нагрузки от наличия общих остаточных деформаций, производится по очевидной зависимости

$$[M_{\text{ост}}] = [M_0] - \sum M, \quad (1)$$

где  $[M_0]$  – значение предельно допускаемого момента для данного корпуса от общего изгиба;  $\sum M$  – суммарный момент от прочих действующих нагрузок, например  $\sum M = M_{\text{Т.В}} - M_{\text{В}} - M_{\text{Т}}$  или  $\sum M = M_{\text{П.Р}}$ ;  $M_{\text{Т.В}}$  – значение изгибающего момента на тихой воде, определяемого, в частности, и с учетом процесса загрузки судна;  $M_{\text{В}}$  – значение ожидаемого волнового изгибающего момента, определяемого, например, по данным характеристик волнения факсимильных карт в зоне эксплуатации судна;  $M_{\text{Т}}$  – значение изгибающего момента от разного восприятия и значений температур связями корпуса, в частности от разницы значений температуры палубы и днища;  $M_{\text{П.Р}}$  – изгибающий момент во время погрузочно-разгрузочных работ.

Как известно, для судов полагают, что значение изгибающего момента от общей остаточной деформации равно по значению и противоположно по знаку значению изгибающего момента от постановки на волну высотой, равной высоте стрелки прогиба остаточной деформации на миделе корпуса судна. Это дает возможность на основании известных выражений изгибающего момента при статической постановке на волну определить значение допускаемой стрелки общей продольной деформации  $[v_{\text{ост}}]$ . В частности, при прямой постановке на волну на миделе судна, получаем для  $[v_{\text{ост}}]$  выражение

$$[v_{\text{ост}}] = [M_{\text{ост}}] k_1 / (BL^2 \gamma), \quad (2)$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от геометрии корпуса судна;  $B$  и  $L$  – ширина и длина корпуса судна соответственно;  $\gamma$  – удельный вес воды.

Определение параметров подкреплений производится при невыхождении у корпуса величины общей остаточной деформации в предельно допускаемое значение. По величине несоответствия фактического значения остаточной продольной деформации  $v_{\text{ост}}^{\text{ф}}$  и предельно допускаемого значения  $[v_{\text{ост}}]$  (с учетом их знака) определяются необходимые характеристики модернизации корпуса. Так определяются величина и место потребного введения площадей, возможно, в частности, и их удаления, преимущественно, использующих расположение дополнительных площадей в места эквивалентного бруса с малым редуцированием, в частности, с отсутствием редуцирования. Потребное изменение значения изгибающего момента от остаточной продольной деформации  $\Delta M_{\text{ост}}$  по сравнению с его допускаемым значением  $[M_{\text{ост}}]$ . Для случая корпуса судна имеем

$$\Delta M_{\text{ост}} = (v_{\text{ост}}^{\text{ф}} - [v_{\text{ост}}]) = BL^2 \gamma / k_1. \quad (3)$$

Компенсировать имеющееся фактическое несоответствие изгибающих моментов возможно за счет приращения момента допускаемого ( $\Delta[M_0]$ ),  $\Delta M_{\text{ост}} \leq \Delta[M_0]$ , при этом зависимость для  $\Delta M_{\text{ост}}$  можно применять и в случае, если будет формально получено  $[v_{\text{ост}}] < 0$ , и в случае, если  $v_{\text{ост}}^{\text{ф}} = 0$  (т. е. когда  $\Delta M_{\text{ост}}$  будет от мнимой общей деформации, к которой сводятся недостатки корпуса судна вследствие наличия деформаций, износов, несоответствия района плавания и т. д.).

Для получения требуемых характеристик сечения корпуса судна нужно ввести суммарную площадь подкрепляющих элементов  $\sum f_{п.э}$ , например полос  $\sum f_{н.п}$ , в площадь пояска эквивалентного бруса, учитывая при этом редуцированный коэффициент вводимых элементов  $\Phi_{п.э}$  и их положение  $h_{п.э}$  относительно исходной оси (как правило, связываемой с основной плоскостью).

На базе значения момента сопротивления исходного корпуса  $W_{п(д)}$  имеем следующую величину значения момента сопротивления сечения корпуса  $W_{п(д)}^P$  с учетом ремонта:

$$W_{п(д)}^P = \frac{\left[ F_{п(д)}^{И+Д} \frac{H}{H_{п.э}} + \Delta F_{п(д)М}^{И+Д} \frac{H}{H_{п.э}} + \sum \left( f_{п.э} \Phi_{п.э} \frac{h_{п.э}}{H_{п.э}} \right) \right] H_{п.э}}{(1 - K_{п(д)М})} =$$

$$= (W_{п(д)} + \Delta W_{п(д)М}) \frac{1 - K_{п(д)}}{1 - K_{п(д)М}} + \frac{H_{п.э} \sum f_{п.э} \Phi_{п.э} \frac{h_{п.э}}{H_{п.э}}}{(1 - K_{п(д)М})}, \quad (4)$$

где  $F_{п(д)}^{И+Д}$  – площадь пояска эквивалентного бруса (ЭБ) корпуса судна до модернизации (с учетом возможных износов и деформаций);  $H$  и  $H_{п.э}$  – высота ЭБ корпуса судна до и после модернизации подкреплением;  $\Delta F_{п(д)М}^{И+Д}$  – приращение площади пояска ЭБ корпуса судна вследствие изменения использования уже имеющихся площадей конструкции, вызванное модернизацией;  $K_{п(д)}$  и  $K_{п(д)М}$  – коэффициент долевого влияния площадей поперечного сечения всех связей корпуса, кроме перекрытий палубы (днища) у ЭБ корпуса до и после модернизации, при этом значения  $K_{п(д)}$ ,  $K_{п(д)М}$  определяются по статистическим данным для аналогичных типов проектов, как исходных, так и по способу модернизации, или непосредственным расчетом по результатам дефектации модернизируемого корпуса. В частности, возможно в первом приближении принимать  $K_{п(д)} \approx K_{п(д)М}$ ;  $h_{п.э}$  – положение центра тяжести подкрепляющего элемента (группы элементов) от исходной оси (как правило, основная плоскость судна);  $\Delta W_{п(д)М} = \Delta F_{п(д)М}^{И+Д} H / (1 - K_{п(д)})$  – приращение момента сопротивления ЭБ модернизированного корпуса только вследствие изменения использования уже имеющихся площадей конструкции, вызванное модернизацией.

Приращение момента сопротивления сечения ЭБ корпуса судна вследствие модернизации,  $\Delta W_{п(д)}^P$ , получим очевидным образом:

$$\Delta W_{п(д)}^P = W_{п(д)}^P - W_{п(д)} = W_{п(д)} \left( \frac{1 - K_{п(д)}}{1 - K_{п(д)М}} - 1 \right) + \Delta W_{п(д)М} \frac{1 - K_{п(д)}}{1 - K_{п(д)М}} + \frac{H_{п.э} \sum f_{п.э} \Phi_{п.э} \frac{h_{п.э}}{H_{п.э}}}{(1 - K_{п(д)М})}. \quad (5)$$

Имея очевидное условие  $\Delta W_{п(д)}^P \geq \Delta[M_O] / \sigma_{ОМ}$ , получим, выражая составляющую потребного введения подкрепляющих элементов

$$\sum f_{п.э} \Phi_{п.э} \frac{h_{п.э}}{H_{п.э}} \geq \frac{\Delta W_{п(д)}^P (1 - K_{п(д)М})}{H_{п.э}} - \frac{W_{п(д)}}{H_{п.э}} (K_{п(д)М} - K_{п(д)}) -$$

$$- \frac{\Delta W_{п(д)М}}{H_{п.э}} (1 - K_{п(д)}) = \frac{\Delta[M_O] (1 - K_{п(д)М})}{\sigma_{ОМ} H_{п.э}} - \frac{W_{п(д)}}{H_{п.э}} (K_{п(д)М} - K_{п(д)}) - \frac{\Delta F_{п(д)М}^{И+Д} H}{H_{п.э}}, \quad (6)$$

где  $\Delta[M_O]$  – потребная величина изменения предельно допускаемого момента от общего изгиба, которая определяется в зависимости от фактического и (или) прогнозируемого значений

прочностных характеристик корпуса, условий эксплуатации, в частности гидрометеорологических условий, значений температуры у связей корпуса;  $\sigma_{OM}$  – нормируемое значение допускаемых напряжений от общего изгиба корпуса судна после модернизации.

В случае модернизации корпуса судна с плоскими палубой и днищем, и только подкреплением накладными полосами на присоединенные пояски продольного набора поясков ЭБ корпуса судна, выражение упростится:

$$\sum \left( f_{H,\Pi} \frac{h_{H,\Pi}}{H} \right) \geq \frac{\Delta[M_O]}{\sigma_O} \frac{1 - K_{\Pi(D)}}{H} \geq \frac{(v_{ост}^{\Phi} - [v_{ост}])}{\sigma_O} \frac{1 - K_{\Pi(D)}}{H} \frac{BL^2 \gamma}{k_1}. \quad (7)$$

При наличии потребного значения  $\sum (f_{H,\Pi} h_{H,\Pi}/H)$ , при наиболее выгодном вложении площадей – в продольные связи поясков ЭБ, например в присоединенные пояски, полки, и знании числа продольных связей остается подобрать размер сечения накладных полос. Для этого выбирается один из размеров сечения – размер ширины или толщины, а затем рассчитывается второй размер накладных полос.

Для величины  $\Delta F_{\Pi(D)M}^{И+Д}$  имеем равенство

$$\Delta F_{\Pi(D)M}^{И+Д} = F_{\Pi(D)M}^{И+Д} - F_{\Pi(D)}^{И+Д}, \quad (8)$$

где  $F_{\Pi(D)}^{И+Д}$  и  $F_{\Pi(D)M}^{И+Д}$  – площадь пояска ЭБ корпуса судна до и после модернизации (с учетом возможных износов и деформаций).

Применительно к корпусам судов с плоскими или близкими к плоским палубой и днищем, без местных деформаций и постоянной на конкретных участках толщиной обшивки, обозначая в этом случае  $F_{\Pi(D)}^{И+Д}$  и  $F_{\Pi(D)M}^{И+Д}$  соответственно через  $F_{\Pi(D)}$  и  $F_{\Pi(D)M}$ , имеем зависимости

$$F_{\Pi(D)} = k_H B t_{CP} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{n_i t_{CPi}}{B t_{CP}} (c_i - c_{li}) (1 - \varphi_i) \right) \right\}, \quad (9)$$

$$F_{\Pi(D)M} = k_{HM} B t_{CP} \left\{ 1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{n_{iM} t_{CPi}}{B t_{CP}} (c_{iM} - c_{liM}) (1 - \varphi_{iM}) \right) \right\}, \quad (10)$$

где  $k_H$  – коэффициент площади набора корпуса судна у соответствующего пояска ЭБ корпуса судна;  $k_{HM}$  – коэффициент площади набора соответствующего пояска ЭБ у модернизированного корпуса судна (может быть близок коэффициенту набора до модернизации, и в первом приближении можно принять  $k_{HM} \approx k_H$ );  $B$  – ширина корпуса судна у соответствующего пояска ЭБ корпуса судна;  $n_i$  и  $n_{iM}$  – число шпаций на  $i$ -м участке поперечного сечения пояска ЭБ корпуса судна до и после модернизации;  $c_i$  и  $c_{iM}$  – шпация на  $i$ -м участке поперечного сечения пояска ЭБ корпуса судна до и после модернизации (при сохранении после модернизации поперечной системы набора –  $c_{iM} = b_{iM}$ , при продольной системе набора  $c_{iM} = a_{iM}$ ) ( $b_{iM}$ ,  $a_{iM}$  – длина и ширина пластины у судна после модернизации);  $c_{li}$  и  $c_{liM}$  – ширина присоединенного пояска обшивки на  $i$ -м участке поперечного сечения пояска ЭБ корпуса судна до и после модернизации;  $t_{CP}$  и  $t_{CPi}$  – средняя толщина обшивки всего пояска и на  $i$ -м участке поперечного сечения пояска ЭБ корпуса судна;  $m$  – число участков по поперечному сечению пояска ЭБ корпуса судна;  $\varphi_i \leq 1$  и  $\varphi_{iM} \leq 1$  – редуцирующий коэффициент гибких связей на  $i$ -м участке поперечного сечения пояска ЭБ корпуса судна до и после модернизации, при этом значения  $k_H$ ,  $k_{HM}$  определяются по статистическим данным для аналогичных типов проектов, как исходных, так и по способу модернизации, или непосредственным расчетом по результатам дефектации модернизируемого корпуса; возможно в первом приближении принимать  $k_H \approx k_{HM}$ .

Очевидно, получим для  $\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}}$  при отсутствии вмятин

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left\{ \sum_{i=1}^m \left[ \frac{n_i t_{\text{СР}i}}{Bt_{\text{СР}}} (c_i - c_{li})(1 - \varphi_i) - \frac{k_{\text{Н}}}{k_{\text{НМ}}} \left( \frac{n_{i\text{М}} t_{\text{СР}i}}{Bt_{\text{СР}}} (c_{i\text{М}} - c_{li\text{М}})(1 - \varphi_{i\text{М}}) \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

Для упрощенного, но часто встречающегося на практике, варианта корпуса судна, когда поперечная шпация постоянна, имеем для ширины корпуса судна следующие зависимости:

- $B = na$  – при продольной системе набора;
- $B = nb$  – при поперечной системе набора.

Тогда для  $\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}}$ , при одинаковом размере шпации по ширине сечения поясков ЭБ, получаем следующее выражение:

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left[ (1 - c_1/c)(1 - \varphi) - (k_{\text{Н}}/k_{\text{НМ}})(1 - c_{1\text{М}}/c_{\text{М}})(1 - \varphi_{\text{М}}) \right]. \quad (12)$$

Конкретизируя для разных систем набора, имеем:

- для продольной системы набора:

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left[ (1 - c_1/a)(1 - \varphi) - (k_{\text{Н}}/k_{\text{НМ}})(1 - c_{1\text{М}}/a_{\text{М}})(1 - \varphi_{\text{М}}) \right], \quad (13)$$

- для поперечной системы набора:

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left[ (1 - c_1/b)(1 - \varphi) - (k_{\text{Н}}/k_{\text{НМ}})(1 - c_{1\text{М}}/b_{\text{М}})(1 - \varphi_{\text{М}}) \right]. \quad (14)$$

Для наиболее часто встречающегося частного случая при продольной системе набора получим для  $\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}}$ :

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = 0,5k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left[ \left[ 1 - \frac{78,5}{\sigma_{\text{T}}} \left( \frac{100t_{\text{СР}}}{a} \right)^2 \right] - \frac{k_{\text{Н}}}{k_{\text{НМ}}} \left[ 1 - \frac{78,5}{\sigma_{\text{T}}} \left( \frac{100t_{\text{СР}}}{a_{\text{М}}} \right)^2 \right] \right]. \quad (15)$$

Для  $k_{\text{Н}}$  ( $k_{\text{НМ}}$  аналогично) дадим следующую формулу:

$$k_{\text{Н}} = 1 + k_{\text{ХН}} + k_{\text{РН}},$$

где  $k_{\text{ХН}}$  – коэффициент влияния продольного холостого набора;  $k_{\text{РН}}$  – коэффициент влияния продольного рамного набора.

Для поперечной системы набора при ширине присоединенного пояса  $c_1$  в половину шпации получим для  $\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}}$  следующую зависимость:

$$\Delta F_{\Pi(\text{Д})\text{М}} = k_{\text{НМ}} Bt_{\text{СР}} \left[ (1 - 0,5a/b)(1 - \varphi) - (k_{\text{Н}}/k_{\text{НМ}})(1 - 0,5a_{\text{М}}/b_{\text{М}})(1 - \varphi_{\text{М}}) \right]. \quad (16)$$

Для момента инерции ЭБ корпуса модернизированного судна  $I_{\text{М}}$  имеем очевидные зависимости:

$$I_{\text{М}} = W_{\text{П}}^{\text{P}} (H_{\text{М}} - z_{\text{НО.М}}), \quad I_{\text{М}} = W_{\text{Д}}^{\text{P}} z_{\text{НО.М}},$$

где  $W_{\text{П}}^{\text{P}}$  и  $W_{\text{Д}}^{\text{P}}$  – моменты сопротивления палубы и днища соответственно;  $H_{\text{М}}$  – высота ЭБ модернизированного судна;  $z_{\text{НО.М}}$  – расстояние от основной плоскости до нейтральной оси ЭБ модернизированного судна.

Мы надеемся, что данный подход найдет понимание у специалистов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бимберев П. А. Исследование повреждаемости, методики освидетельствования и дефектации корпусных конструкций судов внутреннего и смешанного плавания. – Новосибирск: НГАВТ, 2007. – 420 с.

2. *Способ* определения общих остаточных деформаций корпусов транспортных и/или стояночных средств: пат. РФ на изобретение № 2298162 / П. А. Бимбереков. – 2007. – Бюл. № 12.

3. *Способ* контроля общих остаточных деформаций корпусов транспортных и/или стояночных средств: Пат. РФ на изобретение № 2293957 / Бимбереков П. А. – 2007. – Бюл. № 5.

Статья поступила в редакцию 9.03.2011

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

***Бимбереков Павел Александрович*** – Новосибирская государственная академия водного транспорта; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Теория и устройство корабля»; тел.: 8 (383) 221-47-51, 222-75-41.

***Bimberekov Pavel Aleksandrovich*** – Novosibirsk State Academy of Water Transport; Candidate of Technical Science, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department "Theory and Arrangement of a Ship"; tel. 8 (383) 221-47-51, 222-75-41.