

DOI: 10.24143/2073-1574-2017-3-16-23
УДК 629.5.015.4

П. Е. Бураковский

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНО ЗАГРУЖЕННЫХ ШПАНГОУТОВ В ЗАПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Эксплуатация судов сопряжена с возникновением ряда корпусных дефектов, таких как бухтины, гофрировка и вмятины. Поэтому для проектирования судовых корпусных конструкций, оценки их технического состояния и разработки эффективных схем подкрепления необходимо располагать методами расчета корпусных конструкций за пределом упругости. На основании гипотезы о мгновенном раскрытии пластических шарниров предложена методика расчета локально загруженного шпангоута бортового перекрытия после образования в нем кинематически изменяемого механизма при наличии перекрестных связей, поддерживающих обрушившиеся звенья. Методика позволяет учитывать влияние реакций упругопластического основания, роль которого выполняет бортовая обшивка, продольных усилий в шпангоуте и перекрестных связей на его деформирование. Установлено, что увеличение жесткости перекрестных связей ведет к снижению нагрузки, при которой происходит образование в шпангоутах кинематически изменяемого механизма. Отмечается, что при больших прогибах перекрестная связь практически не влияет на деформирование локально загруженных шпангоутов и их поведение определяется действием сил поддержания со стороны бортовой обшивки, а также влиянием продольных сил. Предложенная методика позволяет уточнить роль перекрестных связей в обеспечении прочности локально загруженных шпангоутов в запредельном состоянии, что может быть использовано при проектировании и модернизации корпусов судов для выбора оптимальных размеров связей.

Ключевые слова: локальные нагрузки, бортовое перекрытие, шпангоут, перекрестная связь, пластический шарнир, упругопластическое основание.

Введение

В процессе эксплуатации бортовые перекрытия судов подвергаются действию различных видов нагрузок, при этом наибольшую опасность представляют интенсивные локально распределенные нагрузки (например, ледовые), являющиеся основной причиной повреждений судовых корпусов. Поэтому при проектировании корпусов судов, оценке их технического состояния и разработке подкреплений необходимо располагать методами расчета корпусных конструкций под действием таких нагрузок за пределом упругости, т. к. Российский морской регистр судоходства допускает наличие в связях корпуса остаточных деформаций [1]. При этом возникает проблема учета геометрической и физической нелинейности при деформировании элементов судовых корпусных конструкций. Одним из вариантов ее решения является использование ряда упрощающих гипотез, в числе которых гипотеза «о мгновенном раскрытии пластических шарниров» [2]. Ее применение позволило получить решения для различных видов загрузки балок судовых корпусов [3]. Однако до сих пор не разработаны расчетные схемы, необходимые для оценки прочности реальных судовых конструкций, в частности, отсутствует решение для шпангоута после образования в нем кинематически изменяемого механизма при наличии перекрестных связей, поддерживающих обрушившиеся звенья.

Расчетные схемы бортового перекрытия и шпангоута

На рис. 1 представлены расчетные схемы бортового перекрытия и шпангоута (P – внешняя нагрузка; A – податливость опоры шпангоута; $K(w)$ – зависящий от прогиба w коэффициент жесткости упругопластического основания шпангоута, роль которого выполняет бортовая обшивка; x – координата, отсчитываемая от шпангоута). Рассмотрим бортовое перекрытие, подверженное действию интенсивных локально распределенных эксплуатационных нагрузок (рис. 1, *a*). Такие нагрузки являются случайными по величине, размеру пятна контакта и месту приложения.

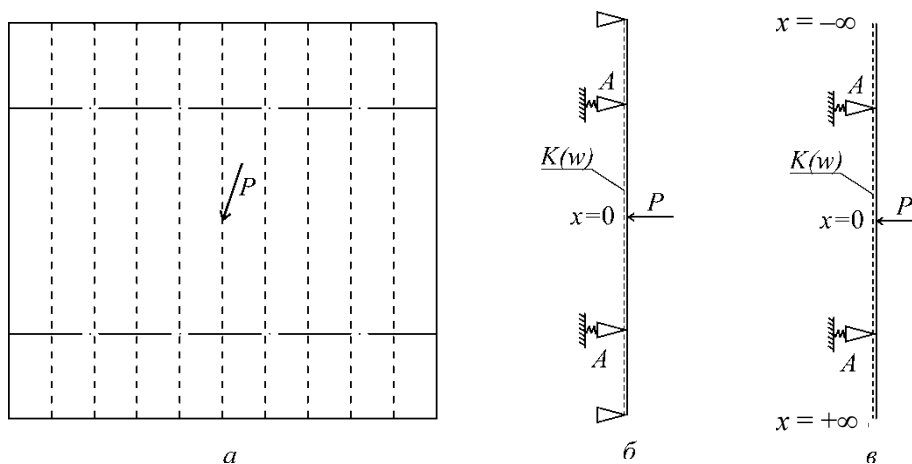


Рис. 1. Расчетные схемы: а – бортовое перекрытие под действием интенсивной локально распределенной нагрузки; б – локально нагруженный шпангоут конечной длины; в – локально нагруженный шпангоут бесконечной длины

Так как целью настоящего исследования является изучение поведения локально нагруженных шпангоутов, будем считать, что указанная нагрузка действует на шпангоут. В том случае, если она приложена к пластине, можно воспользоваться решениями [2, 4], методика расчета локально нагруженной перекрестной связи представлена в [3, 4]. При этом остановимся на наиболее неблагоприятном случае, когда нагрузка локализована в пределах одной шпации и приложена в середине пролета шпангоута. В случае распределения нагрузки в пределах нескольких шпаций имеет место существенный рост распорных характеристик пластин обшивки, которые выполняют роль упругопластического основания шпангоута, в результате наблюдается увеличение поддерживающих его усилий [3].

Рассмотрим локально нагруженный шпангоут бортового перекрытия с перекрестными связями, расчетная схема которого представлена на рис. 1, б. Ввиду того, что при действии интенсивных локально распределенных нагрузок происходит локализация деформаций в месте нагружения, можно воспользоваться расчетной схемой, представленной на рис. 1, в, в которой длина шпангоута принимается неограниченной [3]. Таким образом, расчет шпангоута на первом этапе (до образования кинематически изменяемого механизма) сводится к рассмотрению бесконечной локально нагруженной упругопластической балки, лежащей на многослойном упругопластическом основании, роль которого выполняет бортовая обшивка. Параметры жесткости данного основания изменяются при достижении его прогибами пороговых величин и определяются путем построения и аппроксимации зависимости «сила – прогиб балки-полоски обшивки». По мере увеличения внешней нагрузки в шпангоуте образуется центральный шарнир, а также два внешних нестационарных пластических шарнира, которые будут перемещаться к месту нагружения. При этом внешние шарниры могут образоваться за опорами, на опорах или между точкой приложения нагрузки и опорами.

Расчет шпангоутов в запредельном состоянии

Для описания деформирования шпангоутной ветви бортового перекрытия в запредельном состоянии требуется разбить этот процесс на ряд стадий в зависимости от характера распределения сил поддержания и положения внешнего нестационарного пластического шарнира. При этом для упрощения расчета обрушившиеся звенья шпангоута считаются жесткими и прямолинейными. Обоснованность этого допущения подтверждается небольшими размерами зоны обрушения перекрытия при восприятии интенсивных локально распределенных нагрузок, а также установленным экспериментально [2–4] характером деформаций судовых корпусных конструкций под действием таких нагрузок. В том случае, когда внешний шарнир находится за опорой, а вся обрушившаяся ветвь лежит в пределах прогиба w_1 (рис. 2, а), где жесткость основания характеризуется коэффициентом жесткости K_1 , уравнения, описывающие поведение обрушившегося звена шпангоута, имеют следующий вид при приращении нагрузки ΔP :

$$\frac{P}{2} + \Delta P - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} - K_1 \cdot x \cdot w(x) - \frac{1}{2} K_1 (f + \Delta f - w(x)) x - \frac{T(f + \Delta f - w(x))}{x} = 0; \quad (1)$$

$$\left(\frac{P}{2} + \Delta P\right) x - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} (x - l_A) - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2} K_1 \cdot x^2 \cdot w(x) - \frac{1}{3} K_1 (f + \Delta f - w(x)) x^2 - T(f + \Delta f - w(x)) = 0; \quad (2)$$

$$w(x) = f - \frac{x}{l} (f - f_{\text{вн}}),$$

где P – внешняя нагрузка; ΔP – приращение внешней нагрузки; x – текущая координата внешнего нестационарного пластического шарнира; f – прогиб в месте приложения нагрузки; Δf – прирост прогиба в месте приложения нагрузки; l_A – расстояние от точки приложения нагрузки до опоры; K_1 – коэффициент жесткости упругопластического основания шпангоута; T – продольная сила в шпангоуте; A – податливость опоры шпангоута; $w(x)$ – прогиб балки в месте нахождения внешнего нестационарного пластического шарнира; l – длина звена шпангоута; $f_{\text{вн}}$ – прогиб правого конца звена шпангоута; $M_1(T)$ – предельный момент сечения шпангоута при сжатом присоединенном пояске (центральный пластический шарнир); $M_2(T)$ – предельный момент сечения шпангоута при растянутом присоединенном пояске (внешний нестационарный пластический шарнир); q_1 – q_3 – интенсивность нагрузки, действующей на шпангоут со стороны упругопластического основания.

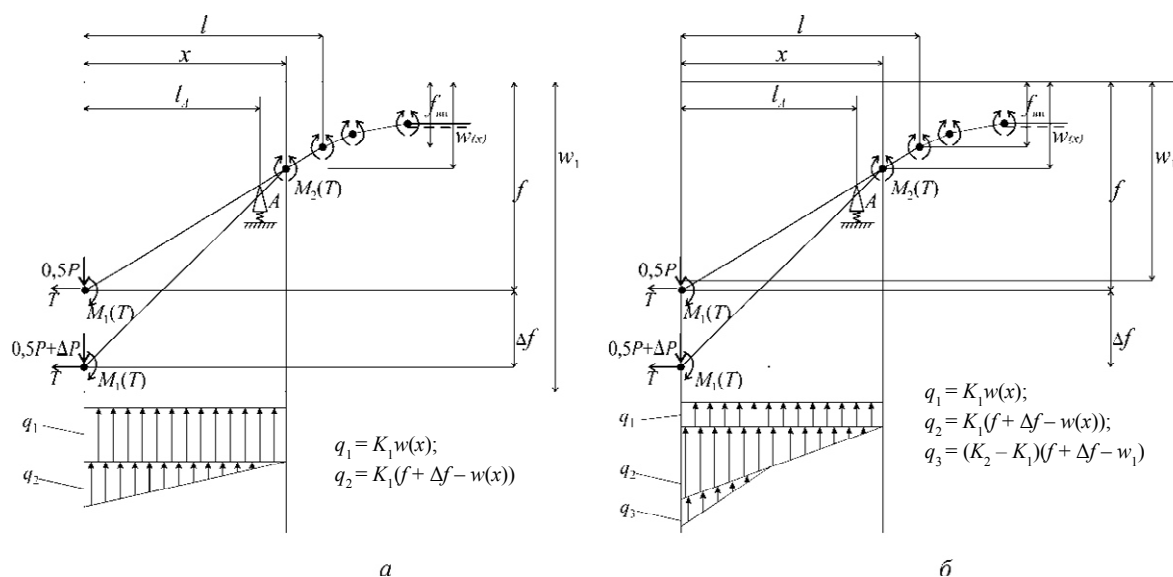


Рис. 2. Схема деформирования звена шпангоута с внешним шарниром за опорой: а – на основании с жесткостью K_1 ; б – одновременно на обоих основаниях

В общем случае при составлении уравнения (2) необходимо использовать соответствующие функции сложного изгиба. Здесь учтено то обстоятельство, что обрушившиеся звенья шпангоута приняты жесткими, и функции сложного изгиба обращаются в единицу. Значения моментов $M_1(T)$, $M_2(T)$ определяются, согласно [5, 6], в зависимости от профиля балки шпангоута, а продольная сила T может быть найдена из уравнения совместности деформаций [3]:

$$T = \frac{E \cdot F \cdot K_{\text{пунт}}}{x} \left[\frac{1}{2} \int_0^x [v'(x)]^2 dx - \sum_i \theta_i \frac{\partial M_i(T)}{\partial T} \right],$$

где E – модуль Юнга; F – площадь сечения профиля шпангоута; $K_{\text{ршпн}}$ – коэффициент распора шпангоута; $v'(x)$ – упругая линия шпангоута; θ_i – угол слома в i -м пластическом шарнире; $M_i(T)$ – предельный момент сечения для i -го пластического шарнира.

Коэффициент распора шпангоута определяется согласно [2, 3]:

$$K_{\text{ршпн}} = \frac{0,08 + 0,6 \frac{2x}{a}}{1,08 + 0,6 \frac{2x}{a}},$$

где a – шпация перекрытия; x – координата внешнего нестационарного пластического шарнира.

Если внешний шарнир находится на основании K_1 , а шарнир под силой на основании K_2 (рис. 2, б), то при приращении нагрузки на ΔP имеет место следующая стадия деформации:

$$\begin{aligned} \frac{P}{2} + \Delta P - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} - K_1 \cdot x \cdot w(x) - \frac{1}{2} K_1 (f + \Delta f - w(x))x - \\ - \frac{1}{2} (K_2 - K_1)x \cdot \frac{(f + \Delta f - w_1)^2}{f + \Delta f - w(x)} - \frac{T(f + \Delta f - w(x))}{x} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{2} + \Delta P\right)x - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} (x - l_A) - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2} K_1 \cdot x^2 \cdot w(x) - \\ - \frac{1}{3} K_1 (f + \Delta f - w(x))x^2 - \frac{1}{2} (K_2 - K_1)x^2 \cdot \frac{(f + \Delta f - w_1)^2}{f + \Delta f - w(x)} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{f + \Delta f - w_1}{f + \Delta f - w(x)}\right) - T(f + \Delta f - w(x)) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Если звено полностью лежит на основании жесткостью K_2 (рис. 3, а), то при приращении нагрузки на ΔP соответствующие уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{P}{2} + \Delta P - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} - K_1 \cdot x \cdot w_1 - K_2 \cdot x(w(x) - w_1) - \\ - \frac{1}{2} K_2 (f + \Delta f - w(x))x - \frac{T(f + \Delta f - w(x))}{x} = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{2} + \Delta P\right)x - \frac{[x(f + \Delta f) - l_A(f + \Delta f - w(x))]}{xA} (x - l_A) - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2} K_1 \cdot x^2 \cdot w_1 - \\ - \frac{1}{2} K_2 \cdot x^2 (w(x) - w_1) - \frac{1}{3} K_2 (f + \Delta f - w(x))x^2 - T(f + \Delta f - w(x)) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

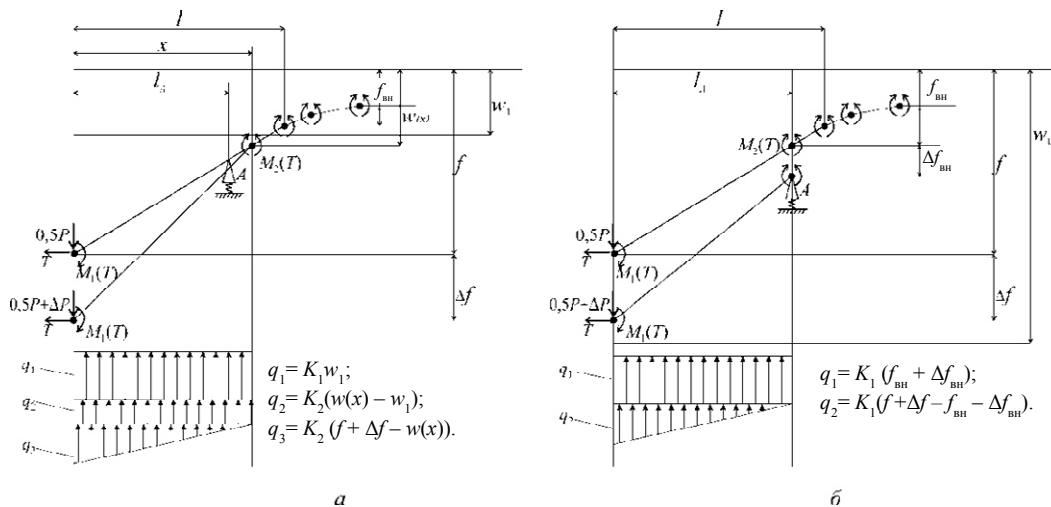


Рис. 3. Схема деформирования звена шпангоута: а – на основании с жесткостью K_2 , внешний шарнир за опорой; б – на основании с жесткостью K_1 , внешний шарнир на опоре

По мере движения к месту нагружения внешний нестационарный пластический шарнир оказывается на опоре, при этом необходимо перейти к трем новым расчетным схемам. Если звено лежит на основании с жесткостью K_1 (рис. 3, б), то соответствующие уравнения принимают вид

$$\frac{P}{2} + \Delta P - \frac{f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}}{A} - K_1 \cdot l_A \cdot (f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}) - \frac{1}{2} K_1 (f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) l_A - \frac{T(f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}})}{l_A} = 0;$$

$$\left(\frac{P}{2} + \Delta P \right) l_A - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2} K_1 \cdot l_A^2 (f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}) - \frac{1}{3} K_1 (f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) l_A^2 - T(f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) = 0,$$

где $\Delta f_{\text{вн}}$ – приращение прогиба правого конца звена шпангоута.

Если внешний шарнир находится на основании K_1 , а шарнир под силой на основании K_2 (рис. 4, а), то при приращении нагрузки на ΔP имеет место следующее:

$$\frac{P}{2} + \Delta P - \frac{f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}}{A} - K_1 \cdot l_A (f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}) - \frac{1}{2} K_1 (f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) l_A - \frac{1}{2} (K_2 - K_1) l_A \cdot \frac{(f + \Delta f - w_1)^2}{f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}} - \frac{T(f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}})}{l_A} = 0;$$

$$\left(\frac{P}{2} + \Delta P \right) l_A - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2} K_1 \cdot l_A^2 (f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}) - \frac{1}{3} K_1 (f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) l_A^2 - \frac{1}{2} (K_2 - K_1) l_A^2 \cdot \frac{(f + \Delta f - w_1)^2}{f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}} \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{f + \Delta f - w_1}{f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}} \right) - T(f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) = 0.$$

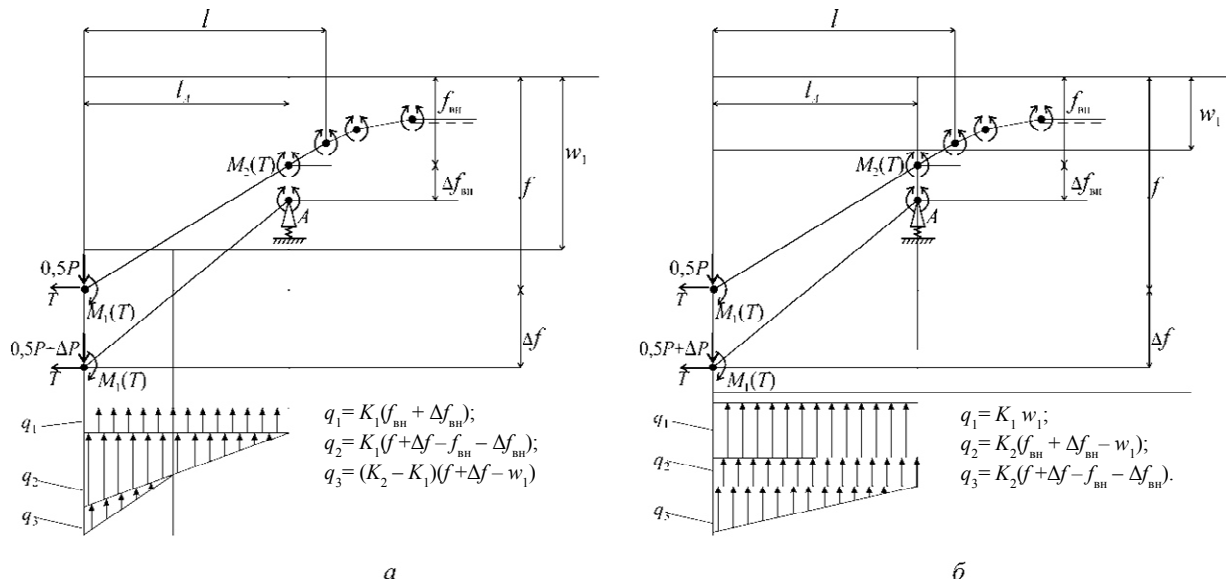


Рис. 4. Схема деформирования звена шпангоута с внешним шарниром на опоре:
 а – одновременно на обоих основаниях; б – на основании с жесткостью K_2

В том случае, когда все звено лежит на основании с жесткостью K_2 (рис. 4, б), соответствующие уравнения имеют вид

$$\frac{P}{2} + \Delta P - \frac{f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}}}{A} - K_1 \cdot l_A \cdot w_1 - K_2 (f_{\text{вн}} + \Delta f_{\text{вн}} - w_1) l_A - \frac{1}{2} K_2 (f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}}) l_A - \frac{T(f + \Delta f - f_{\text{вн}} - \Delta f_{\text{вн}})}{l_A} = 0;$$

$$\left(\frac{P}{2} + \Delta P\right)l_A - M_1(T) - M_2(T) - \frac{1}{2}K_1 \cdot l_A^2 \cdot w_1 - \frac{1}{2}K_2(f_{вн} + \Delta f_{вн} - w_1)l_A^2 - \frac{1}{3}K_2(f + \Delta f - f_{вн} - \Delta f_{вн})l_A^2 - T(f + \Delta f - f_{вн} - \Delta f_{вн}) = 0.$$

При дальнейшем увеличении нагрузки внешний нестационарный пластический шарнир начнет перемещаться между упругой опорой и местом приложения нагрузки. В этом случае деформирование шпангоута будет описываться уравнениями, представленными в [3]. Эти выражения могут быть получены из (1), (2), (3)–(6) при подстановке в них $A = \infty$, что равнозначно отсутствию упругой опоры.

Результаты расчета по предложенной методике

С использованием предложенной методики был проведен расчет промежуточных шпангоутов, изготовленных из несимметричного полосульба 1ба, шпация бортового перекрытия принималась равной 600 мм, толщина обшивки $t = 13$ мм. Результаты расчета при различных жесткостях перекрестной связи представлены на рис. 5, где P_0 – предельная нагрузка промежуточного шпангоута, определенная по теории предельного равновесия.

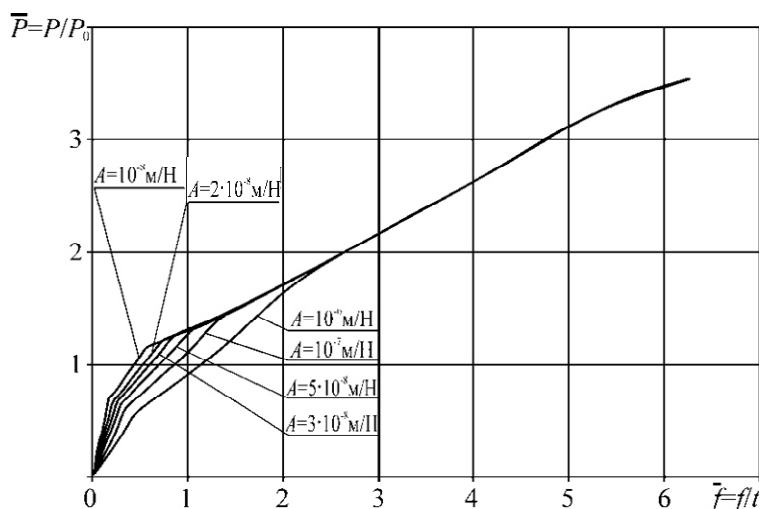


Рис. 5. Зависимость «сила – прогиб локально нагруженных шпангоутов», поддерживаемых перекрестными связями

Из рис. 5 следует, что с увеличением жесткости перекрестных связей уменьшается нагрузка, соответствующая образованию в шпангоутах кинематически изменяемого механизма. Это объясняется снижением сил поддержания со стороны упругопластического основания, роль которого выполняет бортовая обшивка, т. к. повышение жесткости перекрестной связи приводит к уменьшению прогибов шпангоутов. В то же время при больших прогибах перекрестная связь практически не влияет на деформирование локально нагруженных шпангоутов, и их поведение определяется действием сил поддержания со стороны бортовой обшивки, а также влиянием продольных сил.

Заключение

Предложенная методика позволяет оценивать влияние перекрестных связей на деформирование локально нагруженных шпангоутов в запредельном состоянии, что может быть использовано при проектировании и модернизации корпусов судов для выбора оптимальных размеров связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. СПб.: Рос. мор. регистр судов-ва, 2014. 350 с.

2. Бураковский Е. П. Совершенствование нормирования параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов. Калининград: Калинингр. гос. техн. ун-т, 2005. 339 с.
3. Бураковский П. Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации: моногр. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. 298 с.
4. Бураковский Е. П., Бураковский П. Е. и др. Эксплуатационная прочность корпусов промысловых судов: учебн. пособ. СПб.: Арт-Экспресс, 2012. 392 с.
5. Анполонов Е. М., Таровик О. В. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций. СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2012. 128 с.
6. Беленький Л. М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии. Л.: Судостроение, 1983. 448 с.

Статья поступила в редакцию 03.02.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бураковский Павел Евгеньевич – Россия, 236035, Калининград; Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота Калининградского государственного технического университета; канд. техн. наук; доцент кафедры безопасности мореплавания; paul_b@mail.ru.



P. E. Burakovskiy

INFLUENCE OF CROSS CONNECTIONS ON DEFORMATION OF LOCALLY LOADED FRAMING IN CRITICAL STATE

Abstract. Operation of ships is associated with the occurrence of a number of hull defects such as cambers, corrugation and dents. Therefore, for the design of ship hull structures, their technical evaluation and development of effective reinforcement schemes it is necessary to have inelastic calculation methods of hull structures. Relying on the hypothesis "on the instant disclosure of plastic hinge", this paper presents a calculation procedure for locally loaded transverse framing after formation of a cinematically variable mechanism in it, in the presence of cross connections supporting the fallen units. This method takes into account the impact of elastic-plastic base reactions, the role of which is taken by skin plate, longitudinal forces in framing and cross connections on its deformation. It has been found that increasing the rigidity of cross connections leads to reduction of load at which a cinematically variable mechanism is formed in framing. It has been noted that with large deflections, cross connection has practically no effect on deformation of the locally loaded framing, and its behavior is determined by the action of buoyancy forces from the skin plate, as well as the influence of longitudinal forces. The proposed method specifies the role of cross connections in ensuring strength of locally downloaded framing in critical state that can be used in design and modernization of ship hulls to choose the optimum size of connections.

Key words: local load, ship hull, framing, cross connection, plastic hinge, elastic-plastic base.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsionnykh osvidetel'stvovaniy sudov v ekspluatatsii* [The Rules for the Classification Surveys of Ships in operation]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2014. 350 p.
2. Burakovskii P. E. *Sovershenstvovanie normirovaniya parametrov ekspluatatsionnykh defektov korpusov sudov* [Improvement of parameter regulation of ship hull operational defects]. Kaliningrad, Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2005. 339 p.
3. Burakovskii P. E. *Obespechenie prochnosti korpusnykh konstruktii sudov v protsesse ekspluatatsii: monografiya* [Providing stability to hull structures in the course of a ship operation: monograph]. Kaliningrad, Izd-vo BGARF, 2015. 298 p.

4. Burakovskii E. P., Burakovskii P. E. i dr. *Ekspluatatsionnaia prochnost' korpusov promyslovykh sudov: uchebnoe posobie* [Operational stability of the hull of a fishing vessel: training manual]. Saint-Petersburg, Art-Ekspress Publ., 2012. 392 p.
5. Appolonov E. M., Tarovik O. V. *Predel'nye nagruzki i uprugoplasticheskoe deformirovanie sudovykh balochnykh konstruksii* [Critical loads and elasto-plastic deformation of the ship frameworks]. Saint-Petersburg, TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2012. 128 p.
6. Belen'kii L. M. *Raschet sudovykh konstruksii v plasticheskoi stadii* [Analysis of the ship structures in the plastic stage]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 448 p.

The article submitted to the editors 03.02.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Burakovskiy Pavel Evgenievich – Russia, 236035, Kaliningrad; Baltic Fishing Fleet State Academy of Kaliningrad State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of Maritime Safety Department; paul_b@mail.ru.

