

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.12.011.1.001

П.А. Бимбереков

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО ДОПУСКАЕМОМУ ПРОГИБУ БАЛКИ ПРОФИЛЕЙ

ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»

Представлен вариант схемы проектирования профиля по значению предельно допустимого прогиба балки, который представляет модификацию проектирования оптимального по моменту сопротивления сечения профиля с учетом сдвиговых деформаций. Данный вариант проектирования актуален для телескопических люковых закрытий, не превышение допустимого прогиба от действующей нагрузки у которых обуславливает их работоспособность.

*Ключевые слова:* проектирование, судовой профиль, допускаемый прогиб, оптимизация

В [1] показано, что параметры профиля, удовлетворяющие требованиям технологичности и устойчивости, могут быть получены только при оптимизации сечения профиля по моменту сопротивления. Поэтому в [1], зависимости, полученные при оптимизации сечения профиля по моменту сопротивления, были переведены к зависимостям по другим нормируемым параметрам, в частности, по моменту инерции сечения профиля. В случаях, когда лимитирован прогиб для данной балки  $[\varpi]$ , необходимо производить подбор оптимального профиля, одновременно учитывающий изгибную и сдвиговую составляющие прогиба.

Для оптимального профиля, проектируемого по моменту сопротивления его сечения с присоединенным пояском обшивки  $W$ , приведенного к соответственному моменту инерции  $I$ , имеем следующую зависимость для высоты стенки  $h$  [1, С.142], по выражению

$$h = \sqrt[4]{6 \frac{k_{II}}{1+k_{II}} Im}, \quad (1)$$

где  $k_{II} = f_1/f$  ( $f_1$  и  $f$  - площади сечений полки и стенки профиля соответственно);  $m = h/t$  ( $h$  и  $t$  - высота и толщина стенки профиля соответственно).

Для оптимального профиля, спроектированного по  $W$ , соотношение составляющих прогиба от изгиба  $\varpi_u$  и сдвига  $\varpi_{сд}$  выражается зависимостью [1, с. 216]

$$\frac{\varpi_{сд}}{\varpi_u} = \frac{2C_u}{C_{сд}} (1 + \mu) \frac{h^2}{l^2} \frac{k_{II} + 1}{6k_{II}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $l$  - длина пролета балки.

Для составляющей прогиба от изгиба  $\varpi_u$  имеем известное выражение

$$\varpi_u = Ql^3 / (C_u EI), \quad (3)$$

где  $Q$  - значение действующей нагрузки;  $E$  - модуль Юнга.

Общий прогиб от изгиба и сдвига  $\varpi$  выразится очевидной зависимостью

$$\varpi = \varpi_u + \varpi_{c\delta} = \varpi_u \left( 1 + \frac{\varpi_{c\delta}}{\varpi_u} \right) = \varpi_u \left( 1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2}{l^2} \frac{k_{II} + 1}{6k_{II}} \right). \quad (4)$$

Приняв допускаемое значение общего прогиба  $[\varpi]$  из (4), выразим  $\varpi_u$ , получая при этом его допускаемое значение  $[\varpi_u]$

$$[\varpi_u] = [\varpi] \left( 1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2}{l^2} \frac{k_{II} + 1}{6k_{II}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Выражая из (3)  $I$  и беря в расчет допускаемое значение  $[\varpi_u]$  по (5), получим допускаемое значение для момента инерции профиля  $[I]$ , оптимально проектируемого по моменту сопротивления  $W$  с учетом сдвига

$$[I] = \frac{Ql^3}{C_u E [\varpi_u]} = \frac{Ql^3}{C_u E [\varpi]} \left( 1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2}{l^2} \frac{k_{II} + 1}{6k_{II}} \right). \quad (6)$$

Подставим (6) в (1) и преобразуем относительно  $h$

$$h^4 - h^2 \frac{2(1 + \mu)m}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} - 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} m = 0. \quad (7)$$

Разрешив (7) относительно  $h$ , получим

$$h = \sqrt{\frac{(1 + \mu)m}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2 m^2}{C_{c\delta}^2} \left( \frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} m}}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определить оптимальную высоту профиля с учетом деформаций изгиба и сдвига, при заданной нагрузке  $Q$ , данном виде защемления балки, известном материале балки (известных коэффициенты  $\mu$  и модуле Юнга  $E$ ), заданном допускаемом прогибе балки  $[\varpi]$ , а также выбранных коэффициенты  $m$  и получаемом значении коэффициента  $k_{II}$ . Однако для последнего еще надо получить расчетное выражение.

Для толщины стенки профиля из (8) получим равенство

$$t = \sqrt{\frac{(1 + \mu)}{C_{c\delta} m} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2}{C_{c\delta}^2 m^2} \left( \frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi] m^3}}}. \quad (9)$$

Для площади сечения профиля, базирясь на (9), имеем выражение

$$F_T = (1 + k_{II}) t^2 m = \frac{(1 + k_{II})(1 + \mu)}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2 (1 + k_{II})^2}{C_{c\delta}^2} \left( \frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + \frac{6k_{II}(1 + k_{II})Ql^3}{C_u E[\varpi] m}}. \quad (10)$$

Выражение (8) можно преобразовать к следующему виду

$$h = \frac{(1 + \mu)}{C_{c\delta} t} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \frac{1}{t} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2}{C_{c\delta}^2} \left( \frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} \frac{1}{m}}. \quad (11)$$

Введем обозначение

$$I_p = Ql^3 / (C_u E[\varpi]). \quad (12)$$

Тогда (11) с учетом (12) примет вид

$$h = \frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{\text{сд}} t} \frac{1}{l^2} + \frac{1}{t} \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{\text{сд}}^2} \left( \frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{\Pi}}{1+k_{\Pi}} \frac{I_p}{m}}. \quad (13)$$

Для оптимального профиля справедливы соотношения [1, С.119]

$$f = \frac{2(1-3k_{\Pi})}{k_{\Pi}-2} f_2, \quad k_{\Pi} = \frac{2(f_2 - f)}{6f_2 + f}, \quad (14)$$

где  $f_2$  - площадь сечения присоединенного пояска обшивки.

Основываясь на первом выражении (14), а также (12), имеем

$$\frac{2(1-3k_{\Pi})}{k_{\Pi}-2} f_2 = f = ht = \frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{\text{сд}} l^2} + \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{\text{сд}}^2} \left( \frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{\Pi}}{1+k_{\Pi}} \frac{I_p}{m}}. \quad (15)$$

Для предварительного определения величины коэффициента  $k_{\Pi}$  в правой части равенства (15) можно воспользоваться формулой (1), вводя в него вместо  $I$  величину  $I_p$  по (12). Тогда

$$k_{\Pi p} = 0,68 \left( I_p / (m f_2^2) \right)^{0,2}. \quad (16)$$

Аппроксимируем дробь в (15) перед  $f_2$  следующим выражением

$$2(1-3k_{\Pi}) / (k_{\Pi}-2) = 6k_{\Pi}^{3,5}. \quad (17)$$

Из выражения (15) с учетом (17) получим равенство

$$k_{\Pi} = \left\{ \frac{1}{6f_2} \left[ \frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{\text{сд}} l^2} + \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{\text{сд}}^2} \left( \frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{\Pi p}}{1+k_{\Pi p}} \frac{I_p}{m}} \right] \right\}^{1/3,5}. \quad (18)$$

Выражения (1)...(18) позволяют полностью решить поставленную задачу.

Приведём пример предварительного расчета по полученной схеме в табл.1, произведенный без приведения расчетных значений к сортаменту листового проката и реальным значениям ширины (высоты) элементов. Принято, что рассчитываемая балка имеет равномерно распределённую нагрузку и свободно опёрта по концам. Ряд величин в табл. 1 представлен в сантиметрах, так как и в практике проектирования, и в нормативных документах, приняты именно эти единицы, а кроме того, данная таблица предваряет расчет приведенных далее вариантов по специальной программе, где также использованы сантиметры).

Таблица 1

**Предварительный расчет параметров сечения профиля**

№	Наименование, обозначения, расчетные формулы	Значение, расчет
1	2	3
1	Нагрузка, $Q$ , кН	300
2	Длина балки, $L$ , м	2,4
3	Коэффициент $\square$	0,3
4	Предельный прогиб, $[\omega]$ , м	0,0096
5	Коэффициент $C_{\text{И}}$	76,8
6	Коэффициент $C_{\text{сд}}$	8
7	Модуль упругости, $E \times 10^5$ , МПа	2,1
8	Напряжение текучести материала, $\square \square_{\text{т}}$ , МПа	295
9	Расчетный комплекс $I_p$ : $QL^3 / (C_{\text{И}} E [\omega])$ , см <sup>4</sup>	2679

Окончание табл. 1

1	2	3
10	Присоединенный поясок: толщина, $t_2$ , см ширина, $b_2$ , см площадь, $f_2=t_2b_2$ , см <sup>2</sup>	0,8 43,5 34,8
11	Коэффициент $m_{co}=(h/t)_{max}$ при $\sigma_T=235$ МПа	60
12	Коэффициент $m_c=m_{co} ((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$	54
13	Коэффициент $k_{п}$ , по формуле (18)	0,414
14	Толщина стенки $t$ , см, по формуле (9)	0,431
15	Высота стенки $h$ , см, по формуле (13)	23,1
16	Площадь стенки $f=ht$ , см <sup>2</sup>	9,97
17	Коэффициент $k_{п}=2(f_2+f)/(6f_2+f)$	0,409
18	Площадь полки $f_1=k_{п}f$ , см <sup>2</sup>	0,427
19	Коэффициент $m_1=b_1/t_1=25((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$	22,3
20	Толщина полки $t_1=(f_1/m_1)^{1/2}$ , см	0,427
21	Ширина полки $b_1=f_1/t_1$ , см	9,52
22	Площадь полки $f_1=h_1t_1$ , см <sup>2</sup>	4,07
23	Расчетный прогиб, $\varpi$ , м	0,00958

Как видно из табл. 1 расчет дал удовлетворительный результат.

Заданные прочностные параметры				Кoeffициенты		Присоединенный поясок				Характеристики материала и условий работы							
вспомогательные				расчетный		вида балки											
Момент сопротивления $W$ , см <sup>3</sup>	Момент инерции $I$ , см <sup>4</sup>	Привед. площадь сечения $F_{пр}$ , см <sup>2</sup>	Предельный момент сопротив. $W_{пр}$ , см <sup>4</sup>	Предельный прогиб $\varpi$ , м	Нагрузка $Q$ , кН	$C_{и}$	$C_{сд}$	Длина балки, м $l$	$t_2$ , см	$b_2$ , см	$f_2=t_2b_2$ , см <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , МПа	$E$ , 10 <sup>3</sup> МПа	Кoeff. Пуассона, $\mu$	$m_{co}=(h/t)_{max}$ при $\sigma_T=235$ МПа	$m_c=m_{co} ((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$	
При $\sigma_T=235$ МПа	150	2910	21	254	0,0096	300	76,8	8	2,4	0,8	43,5	34,8	295	2,1	0,3	60	54
$\sigma_T$	119	2318	17	202													

Толщина стенки расчет  $t$ , см: 0,42

Высота стенки расчетная  $h$ , см: 23,61

Площадь стенки  $f=ht$ , см<sup>2</sup>: 9,2

Толщина полки  $t_{1min}=(f_1/m_1)^{1/2}$ , см: 0,41

Ширина полки  $b_1$ , см: 9,29

Площадь полки  $f_1=b_1t_1$ , см<sup>2</sup>: 4,00

Фактические значения прочностных параметров:

$F_r$ , см <sup>2</sup>	$W$ , см <sup>3</sup>	$I$ , см <sup>4</sup>	$F_{пр}$ , см <sup>2</sup>	$W_{пр}$ , см <sup>4</sup>	$\varpi$ , м
13,20	157,12	3072,15	7,96	217,80	0,00958
$\Delta b_1=\Delta f_1/t_1$ , см	-4,704	-0,674	10,848	-1,449	-0,005

Погрешность удовлетворения заданию, %:

$F_r$	$W$	$I$	$F_{пр}$	$W_{пр}$	$\varpi$
31,49	32,53	-52,39	7,64	-0,19	

Примечание. Толщины листового проката в диапазоне значений 2...30 мм принимать с шагом в 1 мм, причем следующие значения толщин листового проката нежелательны для использования (13,15,17,19,21,24,26).

Таблица 2 - Рекомендуемые величины отношения высоты стенки к ее толщине  $m=h/t$

№	Условия эксплуатации	Требование к устойчивости	Назначение балки	$m=h/t$
1	Наряду с изгибом возможно осевое сжатие. Напряжения сжатия соизмеримы с пределом текучести. Возможны случайные локальные нагрузки, вызывающие появление значительных остаточных деформаций	Не должно быть потери устойчивости при действии поперечных нагрузок, вызывающих остаточные прогибы при осевом сжатии до предела текучести	Набор бортов, грузовых палуб и настилов, продольные связи днища и палубы, поперечный набор днища в оконечностях	40 PPP дает до 55
2	Напряжения осевого сжатия незначительны. Случайные перегрузки исключены или маловероятны. Наряду с нормальными напряжениями изгиба действуют касательные напряжения, соизмеримые с пределом текучести	Не должно быть потери устойчивости при одновременном появлении фибровой текучести полки от изгиба и текучести стенки от сдвига	Набор переборок, поперечные связи днища в средней части (кроме судов, эксплуатирующихся на мелководье), поперечный набор палуб, не предназначенных для размещения груза	60
3	Случайные нагрузки исключены или маловероятны. Напряжения осевого сжатия и касательные напряжения - незначительны	Не должно быть потери устойчивости при появлении фибровой текучести полки	Набор люковых крышек, не предназначенных для размещения груза, набор надстроек и рубок, не участвующих в общем изгибе корпуса	80

где PPP - Российский Речной Регистр

Критерии качества профиля:

$2W/(F_r+f_2)h$	0,2846431	$2W/F_rh$	1,035066
$W^{2/3}/(F_r+f_2)$	0,6066227	$\Delta f/\Delta f$	1,050312

Рис. 1. Пример 1 программы расчета сечения профиля балки при задании допустимого прогиба, а также ряда геометрических параметров его сечения



Отметим, что следует произвести специальные исследования по работоспособности стенок балок относительно малых толщин по сравнению с присоединенными поясками обшивки при величинах толщин обшивки 0,010 м и более.

### **Выводы**

Предложенная схема расчета, имеющая в своей основе получение оптимальных соотношений элементов сечения профиля при оптимизации его по моменту сопротивления с одновременным удовлетворением требования не превышения заданного прогиба, дала удовлетворительный результат и её можно рекомендовать к практическому использованию.

- 
1. **Бимбереков, П.А.** Анализ и оптимизация размеров профилей и эквивалентного бруса корпуса судна / П.А. Бимбереков. – Новосибирск: НГАВТ, 2004. – 272 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.10.2011*

**P.A. Bimberekov**

### **DESIGNING OF SHAPES OPTIMAL IN SECANT MODULUS BY ALLOWABLE DEFLECTION OF GIRDER**

Hereby was represented variant of shape designing scheme by maximum girder deflection value. This variant is modification of designing of shape cross-section optimal in secant modulus taking in account shear deformation. Given variant of designing is actual for telescopic hold covers which working capacity is conditioned by unexcess of allowable deflection because of acting load.

*Key words:* designing, ship shape, allowable deflection, optimization.