[4] Меткин Н.П., Лапин М.С. Гибкие производственные системы. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 311 с.
[5] Имитационное моделирование. Теория и практика: Материалы IV-й всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – ИММОД. – 2009.

С.Н. Гирин, А.С. Оноприенко
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

РЕГРЕССИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЙЛЕРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПЛАСТИН ПРОДОЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБОРА КОРПУСА СУДНА С УЧЕТОМ УПРУГОСТИ РЕБЕР

Учет крутильной жесткости ребер положительно сказывается на общей прочности корпуса судна, что было показано в статье авторов «Об учете влияния упругой заделки кромок пластины на общую прочность корпуса судна» [1]. Использование программы для ЭВМ, описанной в этой же статье, позволяет определять значения эйлеровых напряжений для пластин с учетом подкрепления достаточно просто и быстро. Однако в инженерных расчетах гораздо удобнее использовать не саму программу, а полученные с ее помощью простые регрессионные зависимости. Правила Российского Речного Регистра [2] содержат формулу для определения эйлеровых напряжений свободно опертой пластины. Поэтому логично ввести в нее в качестве сомножителя коэффициент увеличения устойчивости пластины с упругими ребрами $K_э$ по сравнению со свободно опертой пластиной.

Регрессионные зависимости были получены с использованием программного комплекса STATISTICA 6.0 (метод «Множественная регрессия»). Общая задача этого метода состоит в подгонке гиперплоскости к некоторому набору точек. Результатом выполнения множественной регрессии является зависимость вида:

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + ... + b_p \cdot X_p,$$

где a – свободный член;
X – независимая переменная;
b – регрессионный коэффициент.

В качестве подкрепляющих ребер судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания чаще всего применяется неравнополочный уголок и несимметричный полособульб, реже тавр. Для этих профилей и будем находить регрессионные зависимости для определения коэффициента $K_э$.

Прежде всего, необходимо определить переменные, от которых зависит значение коэффициента. Для этого обратимся к решению В.П. Белкина [3], которое было использовано в качестве алгоритма программы для ЭВМ. После анализа решения были определены следующие независимые переменные:

$$\left(\frac{h}{l}\right)^2, \left(\frac{b}{l}\right), \left(\frac{t}{\delta}\right)^3, \left(\frac{b1}{h}\right), \left(\frac{t1}{\delta}\right)^3 \text{ и } \left(\frac{t}{b}\right)^2,$$

где l – длина пластины (размер вдоль направления сжатия), мм;
b – ширина пластины, мм;
t – толщина пластины, мм;

h – высота ребра, мм;
δ – толщина стенки ребра, мм;
$b1$ – ширина полки ребра, мм;
$t1$ – толщина полки ребра, мм.

Однако для полособульба необходимо исключить из списка независимых переменных величину $\left(\frac{t1}{\delta}\right)^3$, а для уголка – $\left(\frac{t1}{\delta}\right)^3$ и $\left(\frac{b1}{h}\right)$, поскольку эти величины в сортаменте зависят от номера профиля.

Для выполнения расчетов в программе STATISTICA 6.0 необходимо задать достаточное количество значений переменных и соответствующих им результатов. Чтобы получить достоверное решение необходимо составить план эксперимента. В теории планировании эксперимента [4] указывается, что к факторам эксперимента (независимым переменным) предъявляются требования дискретности, совместимости и некоррелированности. Дискретность позволяет поддерживать значение фактора на заданном уровне или осуществлять переход на следующий уровень. Совместимость означает, что в эксперименте можно задать такие сочетания факторов, которые не искажают процесс. Некоррелированность – что значения факторов можно изменять независимо друг от друга.

Однако выше представленные переменные не обладают последним свойством, и для них в данном виде план эксперимента не может быть составлен. Часть величин, входящих в переменные, является размерами пластины, а часть – подкрепляющих ребер. Длина и ширина пластины независимы друг от друга и изменяются в соответствии с выбранной шпацией. Размеры профилей зависимы в различных пределах друг от друга, а также зависят от толщины пластины.

Для упрощения расчетов закрепляем размеры профиля и для них в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^K назначаем предельные значения пластины. Каждый фактор X_j принимает значение только на двух уровнях +1 (+) и –1 (–), то есть максимальном и минимальном уровнях. Благодаря этому получаем лимитирующие значения переменных и соответствующее им значение результата, повторяя наблюдения для выбранной линейки размеров профиля (охватываются размеры от наименьших до наибольших).

Необходимое количество опытов в программе STATISTICA 6.0 строго не определено, но по большинству источников составляет, по крайней мере, от 10 до 20 наблюдений на одну переменную. Для тавров было проведено 136, для уголков и полособульбов – по 120 наблюдений (численных расчетов с помощью разработанной ранее программы для ЭВМ). Это позволяет говорить о достоверности полученных результатов.

План эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1

План ПФЭ типа 2^K (K = 3)

№ опыта	X_1 (l)	X_2 (b)	X_3 (t)	$У$
1	+	+	+	
2	-	+	+	
3	+	-	+	
4	-	-	+	
5	+	+	-	
6	-	+	-	
7	+	-	-	
8	-	-	-	

Перечень профилей, использованных при получении регрессионных зависимостей представлен в таблицах 2–4, при этом размеры полособульбов взяты в соответствии с ГОСТ 21937-76, уголков – ГОСТ 8510-86, а размеры тавров из приложения А [4].

Таблица 2

Расчетные характеристики несимметричных полособульбов

Номер полособульба	h	b	δ	Площадь поперечного сечения, см^2
	мм			
5	50	16	4,0	2,86
5,5	55	17	4,5	3,47
6	60	19	5,0	4,28
7	70	21	5,0	5,07
8	80	22	5,0	5,84
9	90	24	5,5	7,03
10	100	26	6,0	8,63
12	120	30	6,5	11,13
14а	140	33	7,0	14,05
14б	140	35	9,0	16,85
16а	160	36	8,0	17,94
16б	160	38	10,0	21,11
18б	180	42	11,0	25,78
20б	200	46	12,0	31,36
22б	220	50	13,0	37,22
24б	240	54	14,0	43,55

Таблица 3

Расчетные характеристики неравнополочных уголков

Номер уголка	h	b	δ	Площадь поперечного сечения, см^2
	мм			
4,5/2,8	45	28	3	2,14
5/3,2	50	32	4	3,17
5,6/3,6	56	36	5	4,41
6,5/5	65	40	6	6,60
7,5/5	75	50	7	8,37
8/5	80	50	5	6,36
9/5,6	90	56	6	8,54
10/6,3	100	63	6	9,58
10/6,3	100	63	10	15,47
11/7	110	70	8	13,93
12,5/8	125	80	10	19,7
14/9	140	90	8	18,00
16/10	160	100	10	22,58
18/11	180	110	10	28,33
20/12,5	200	125	14	43,87

Таблица 4

Расчетные характеристики тавров

h	*b*	*δ*	*t*	Площадь поперечного сечения, см^2
мм				
100	40	4	6	6,4
120	60	4	6	8,4
120	60	5	6	9,6
140	60	4	6	10,4
140	80	5	6	11,8
160	60	4	6	10,0
160	100	5	8	16,0
180	60	4	6	10,8
180	100	5	8	17,0
200	60	4	6	11,6
200	100	5	8	18,0
220	60	4	6	12,4
220	100	6	8	21,2
250	80	4	6	14,8
250	120	6	12	29,4
280	80	5	6	18,8
280	140	8	14	42,0

В результате проведенных опытов были получены следующие регрессионные зависимости и их относительные ошибки:

– для тавра

$$K_э = 1{,}31 + 0{,}12\left(\frac{h}{l}\right)^2 - 0{,}036\left(\frac{b}{l}\right) - 0{,}032\left(\frac{t}{\delta}\right)^3 + 0{,}215\left(\frac{b1}{h}\right) - 0.006\left(\frac{t1}{\delta}\right)^3 - 126\left(\frac{t}{b}\right)^2,$$

ошибка составляет 7,8%;

– для уголка

$$K_э = 1{,}42 - 8{,}08\left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0{,}321\left(\frac{b}{l}\right) - 0{,}0456\left(\frac{t}{\delta}\right)^3 - 18{,}0\left(\frac{t}{b}\right)^2,$$

ошибка составляет 7,4%;

– для полособульба

$$K_э = 1{,}03 - 4{,}30\left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0{,}307\left(\frac{b}{l}\right) - 0{,}050\left(\frac{t}{\delta}\right)^3 + 1{,}45\left(\frac{b1}{h}\right) - 23{,}1\left(\frac{t}{b}\right)^2,$$

ошибка составляет 5,4%.

Программа STATISTICA 6.0 позволяет определить степень влияния переменной на результат с помощью *t*-критерия Стьюдента. В результате оказалось, что некоторые переменные вносят незначительный вклад (ниже 6%) и имеют противоречивое влияние на результат, поэтому от их учета можно отказаться. Ниже приведены окончательные регрессионные зависимости и значение абсолютной ошибки результата:

– для тавра

$$K_э = 1{,}29 - 0{,}032\left(\frac{t}{\delta}\right)^3 + 0{,}191\left(\frac{b1}{h}\right) - 135\left(\frac{t}{b}\right)^2,$$

ошибка составляет 7,9%;

– для уголка

$$K_э = 1{,}41 - 8{,}91\left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0{,}354\left(\frac{b}{l}\right) - 0{,}0471\left(\frac{t}{\delta}\right)^3,$$

ошибка составляет 7,4%;

– для полособульба

$$K_э = 0{,}987 - 5{,}05\left(\frac{h}{l}\right)^2 + 0{,}351\left(\frac{b}{l}\right) - 0{,}0512\left(\frac{t}{\delta}\right)^3 - 1{,}55\left(\frac{b1}{h}\right),$$

ошибка составляет 5,4%.

Полученные регрессионные зависимости весьма просты и позволяют без особых затрат вычислить значения эйлеровых напряжений пластин, подкрепленных продольными ребрами.

Список литературы:

[1] Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Т. 1. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – 304 с.

[2] Российский Речной Регистр. Правила. Т. 2. – М.: Новости, 2008. – 406 с.

[3] Белкин В.П. Работа элементов палубных перекрытий после потери устойчивости / В.П. Белкин – Л.: Судпромгиз, 1956. – 287 с.

[4] Бажан П.И. Основы научных исследований на речном транспорте: Учебное пособие для студентов институтов водного транспорта / П.И. Бажан, Б.И. Вайсблат, И.И. Трянин. Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1990. – 319 с.

[5] Борисов А.М. Конструкция корпуса стального судна. Методические указания к выполнению курсового проекта. / А.М. Борисов – Н.Новгород: ВГАВТ, 2003. – 73 с.

С.Н. Гирин, А.М. Фролов

ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

УТОЧНЕНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА

В соответствии с Правилами Российского Речного Регистра [1] дополнительный волновой изгибающий момент на миделе судна внутреннего плавания определяется по формуле

$$M_{\text{ДВ}} = \pm(k_{\text{р}} M_{\text{В}} + M_{\text{У}}), \qquad (1)$$

где

$M_{\text{В}}$ – волновой изгибающий момент, вызванный непосредственным действием волнения, кН·м;

$k_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий влияние волновой вибрации;

$M_{\text{У}}$ – изгибающий момент, вызванный ударом волн в носовую оконечность (ударный изгибающий момент), кН·м.