

Le Minh Thu

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА ПЛАВУЧЕГО ДОКА
ПО ТРЕБОВАНИЯМ К ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ПРИ ОБЩЕМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ**

Le Minh Thu

**TASK SOLUTION OF A PARAMETRIC DESIGN
OF HULL STRUCTURES OF A FLOATING DOCK
UNDER THE REQUIREMENTS TO DURABILITY AND STABILITY
AT THE GENERAL CROSS BENDING**

Создание конструкции плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем поперечном изгибе является одной из ключевых задач проектирования, особенно для плавучих доков большой грузоподъемности, поскольку эти требования в значительной степени определяют размеры конструктивных элементов днища и стапель-палубы. Рассмотрены математическая модель, алгоритм реализации процедуры проектирования и анализ результатов решения поставленной задачи, показавший эффективность применения поисковых процедур.

Ключевые слова: плавучий док, конструкция корпуса, автоматизированное проектирование конструкции, поперечный изгиб.

The creation of a floating dock design under the requirements to durability and stability at the general cross bending is one of key problems of designing, especially for floating docks with big load-carrying capacity, as these requirements substantially define the sizes of constructive elements of the bottom and a slip deck. The mathematical model, algorithm of realisation of designing procedure and analysis of results of the solution of the set task, showing efficiency of the application of search procedures are considered in the paper.

Key words: floating dock, hull structure, computer-aided design of structures, cross bending.

Проектирование конструкции дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем поперечном изгибе является одной из ключевых задач, особенно для доков большой грузоподъемности, поскольку эти требования в значительной степени определяют размеры конструктивных элементов днища и стапель-палубы.

В [1] рассмотрена постановка этой задачи. Математическая модель задачи проектирования конструкций понтона плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем поперечном изгибе представляется следующим образом: минимизировать функцию

$$A(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{i=3} b_i x_i + \sum_{i=1}^{i=3} n_i f_{0i} \quad (1)$$

при ограничениях:

$$g_1(\mathbf{X}) = W'_1(\mathbf{X}) - W' \geq 0, \quad (2)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = W'_2(\mathbf{X}) - W' \geq 0, \quad (3)$$

$$g_3(\mathbf{X}) = f'_w(\mathbf{X}) - f'_w \geq 0, \quad (4)$$

$$g_4(\mathbf{X}) = x_1 - s_{1-buckling}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (5)$$

$$g_5(\mathbf{X}) = x_2 - s_{2-buckling}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (6)$$

$$g_6(\mathbf{X}) = x_3 - s_{3-buckling}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (7)$$

$$g_7(\mathbf{X}) = x_1 - s_1^0 \geq 0, \quad (8)$$

$$g_8(\mathbf{X}) = x_2 - s_2^0 \geq 0, \quad (9)$$

$$g_9(\mathbf{X}) = x_3 - s_3^0 \geq 0, \quad (10)$$

где $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3\}^T$ – вектор независимых переменных; $A(\mathbf{X})$ – площадь сечения главной поперечной связи понтона, состоящей из стенки, двух поясков и установленных на них балок поперечного набора; b_i – ширина верхнего и нижнего поясков или высота стенки в рассматриваемом поперечном сечении главной поперечной связи; $x_i = s_i$ – толщина соответствующего элемента сечения; n_i – количество балок (ребер жесткости – для стенки) на i -м элементе главной поперечной связи; f_{0i} – площадь сечения балки (ребра жесткости); $W'_1(\mathbf{X}) = W_1(\mathbf{X}) - \Delta W_1(\mathbf{X})$, $W'_2(\mathbf{X}) = W_2(\mathbf{X}) - \Delta W_2(\mathbf{X})$, $f_w'(\mathbf{X}) = f_w(\mathbf{X}) - \Delta f$ – значения моментов сопротивления и площади сечения стенки полностью изношенных конструкций (к концу срока службы дока) при нормативных (нормируемых Правилами [2]) значениях скорости износа и заданном расчетном сроке службы дока; W' – требуемый момент сопротивления к концу расчетного срока службы дока; f_w' – требуемая площадь сечения стенки главной поперечной связи к концу расчетного срока службы дока; $s_{1-buckling}$, $s_{2-buckling}$, $s_{3-buckling}$ – требуемые толщины из условий устойчивости; s_i^0 – ограничения снизу на значения конструктивных параметров, равные толщинам листовых конструкций по требованиям к местной прочности и минимальным толщинам Правил Российского морского регистра [2]. На рис. 1 показано поперечное сечение главной поперечной связи при поперечной системе набора стапель-палубы и днища понтона и при подкреплении стенки горизонтальными ребрами жесткости.

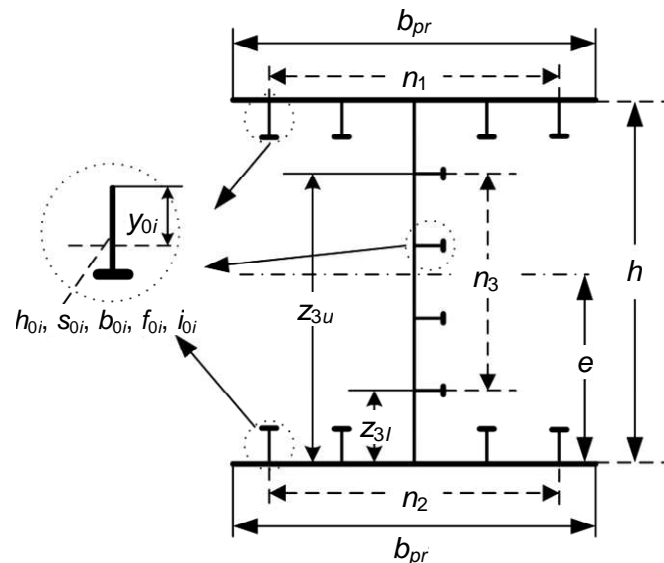


Рис. 1. Поперечное сечение главной поперечной связи

При разработке программного обеспечения принят следующий алгоритм реализации процедуры проектирования:

1. Определение расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил.
2. Формирование поперечного сечения главной поперечной связи понтона и построение целевой функции $A(\mathbf{X})$.
3. Формирование функций-ограничений $g_1(\mathbf{X}) - g_3(\mathbf{X})$.
4. Формирование функций-ограничений $g_4(\mathbf{X}) - g_6(\mathbf{X})$.
5. Формирование функций-ограничений $g_7(\mathbf{X}) - g_9(\mathbf{X})$.
6. Решение задачи нелинейного программирования (1)–(10).

7. Расчет геометрических характеристик поперечного сечения главной поперечной связи понтона и параметров поперечной прочности и устойчивости при сортаментных значениях толщин листовых конструкций, ближайших к полученным в результате решения задачи.

8. Представление окончательных результатов в виде отчетного документа.

Исследование рассмотренной задачи применительно к проектированию конструкций понтона плавучего дока с использованием инструмента Microsoft Excel-2003 «Solver Parameters» показало эффективность предложенного метода и устойчивость оптимизационно-поисковых процедур.

Представленный алгоритм реализуется блоком программных модулей. Организация процесса проектирования осуществляется программой-оболочкой «PONTOON_WIN», интерфейс которой представлен на рис. 2. Предусмотрены 3 режима: подготовка данных – «LOAD DATA», запуск задачи – «CALCULATION» и запись результатов решения задачи – «SAVE RESULTS».

Программа-оболочка написана на языке Visual Basic (VB), а основной модуль расчета написан на языке Visual Basic for Applications (Excel VBA). В этом модуле процесс минимизации целевой функции выполняется вызовом доступных инструментов Microsoft Excel: «Поиск решения – Solver Parameters». Это инструмент предназначен для решения общей задачи нелинейного программирования

$$f(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (11)$$

при ограничениях:

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad (12)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0, \quad j = m + 1, \dots, p. \quad (13)$$

Функция цели $f(\mathbf{X})$ и ограничения задачи $h_j(\mathbf{X})$ и $g_j(\mathbf{X})$ могут быть линейными и (или) нелинейными. В рассматриваемом случае количество независимых (варьируемых) переменных – 3; количество ограничений-равенств – 0; количество ограничений-неравенств – 9.

Рис. 2. Интерфейс программы проектирования конструкции дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем поперечном изгибе – «PONTOON_WIN»: ДП – диаметральной плоскость

Структура исходных данных для проектирования конструкций понтона плавучего дока по требованиям к поперечной прочности представлена в табл. 1–5. Значения толщины элементов листовых конструкций, удовлетворяющие требованиям к местной прочности и минималь-

ным толщинам s_i^0 , которые необходимо знать для формирования ограничений $g_7(\mathbf{X}) - g_9(\mathbf{X})$, считаются известными и входят в состав исходной информации.

Таблица 1

Общие данные

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Тип дока	Понтонный	Монолитный*	Монолитный*
Число понтонов	6	3	3
Расстояние между понтонами/секциями секционного дока, м	1,55	1,2	1
Длина дока по стапель-палубе, м	230,95	304,6	300
Ширина дока, м	50	84	79
Ширина башен по стапель-палубе, м	5	6,5	5
Высота понтона в ДП, м	5,55	7,4	6,6
Высота понтона у башни, м	5,55	7,1	6,6
Тип расчетного судна (1–3)	1	2	2
Относительная длина самого короткого судна	0,9	0,9	0,9
Относительная длина самого длинного судна	1,37	1,37	1,37
Расчетная грузоподъемность дока, т	25 190	80 000	80 000

* Монолитный док с концевыми понтонами для докования центральной части.

Таблица 2

Нормы прочности и материал

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Коэффициент допускаемых нормальных напряжений	0,85	0,85	0,85
Коэффициент допускаемых касательных напряжений	0,8	0,8	0,8
Коэффициент запаса устойчивости листовых элементов	0,75	0,75	0,75
Предел текучести стали, МПа	235	235	355
Коэффициент использования механических свойств стали	1,0	1,0	0,72
Нормативный предел текучести по нормальным напряжениям, МПа	235	235	326
Нормативный предел текучести по касательным напряжениям, МПа	134	134	186

Таблица 3

Расчетные условия эксплуатации

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Коэффициент учета зональных условий эксплуатации ПД	1,1	1,1	1,1
Расчетный срок службы дока, лет	50	50	50
Скорость коррозионного износа листовых конструкций, мм/год			
Стапель-палуба	0,1	0,1	0,1
Обшивка днища	0,08	0,08	0,08
Обшивка поперечной переборки	0,08	0,08	0,08
Скорость коррозионного износа балок набора, мм/год			
Стапель-палуба	0,1	0,1	0,1
Днище	0,1	0,1	0,1
Поперечная переборка	0,1	0,1	0,1

Таблица 4

Конструкция

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Расстояние между поперечными переборками понтона, м	9,3	3,6	5,2
Расстояние между продольными переборками понтона, м	0,0	0,0	3,5
Система набора стапель-палубы	Продольная	Продольная	Поперечная
Система набора днища	Продольная	Продольная	Поперечная
Признак схемы подкрепления поперечной переборки (1–3)*	2	2	3
Расстояние между продольными рамными балками стапель-палубы, м	3,1	3,6	3,6
Расстояние между продольными рамными балками днища, м	3,1	3,6	3,6
Аппликата нижней горизонтальной рамы поперечной переборки, м	2,775	–	0,9
Аппликата верхней горизонтальной рамы поперечной переборки, м	2,775	–	5,7
Среднее расстояние между горизонтальными рамами поперечной переборки, м	2,775	2,5	7,4
Расстояние между балками основного набора стапель-палубы, м	0,6	0,9	0,65
Расстояние между балками основного набора днища, м	0,6	0,9	0,65
Расстояние между балками основного набора поперечной переборки, м	0,65	0,9	0,9

* Признак схемы подкрепления: 2 – с вертикальными ребрами жесткости и горизонтальными рамными балками; 3 – с горизонтальными ребрами жесткости.

Начальные значения конструктивных параметров главных поперечных связей

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Толщина листов по требованиям к местной прочности и минимальным толщинам (начальные значения), мм			
Стапель-палуба	14	20	14
Обшивка днища	14	20	14
Обшивка поперечной переборки	13	19	12
Характеристики балок основного набора стапель-палубы			
Тип профиля балок (1–4)*	3	–	3
Площадь сечения, см ²	155,0	–	109,5
Момент инерции, см ⁴	73 718,9	–	32 631,6
у-Ордината центра тяжести площади сечения, см	46,25	–	35,3
Высота профиля (сортаментная), см	65	–	50
Толщина стенки профиля, мм	14,0	–	13,5
Ширина свободного пояска, см	40	–	12
Толщина свободного пояска, мм	16	–	35
Характеристики балок основного набора днища			
Тип профиля балок (1–4)	3	–	3
Площадь сечения, см ²	155,0	–	55,95
Момент инерции, см ⁴	73 718,9	–	7 979
у-Ордината центра тяжести площади сечения, см	46,25	–	23,8
Высота профиля (сортаментная), см	65	–	35
Толщина стенки профиля, мм	14,0	–	10,5
Ширина свободного пояска, см	40	–	12
Толщина свободного пояска, мм	16	–	16
Характеристики горизонтальных балок набора поперечной переборки понтона			
Тип профиля балок (1–4)	3	–	3
Площадь сечения, см ²	155,0	–	67,13
Момент инерции, см ⁴	73 718,9	–	11 076,1
у-Ордината центра тяжести площади сечения, см	46,25	–	25,8
Высота профиля (сортаментная), см	65,0	–	37,5
Толщина стенки профиля, мм	14,0	–	11,5
Ширина свободного пояска, см	40	–	12
Толщина свободного пояска, мм	16	–	20

* Тип профиля балки: 1 – несимметричный полособульб; 2 – симметричный полособульб; 3 – сварной тавр; 4 – полоса.

Результаты расчета представлены в табл. 6, где используются следующие обозначения для коэффициентов использования нормативного ресурса поперечной прочности:

– по моменту сопротивления на уровне стапель-палубы:

$$k_1 = \frac{W' + \Delta W_1(\mathbf{X})}{W_1(\mathbf{X})}; \quad (14)$$

– по моменту сопротивления на уровне днища:

$$k_2 = \frac{W' + \Delta W_2(\mathbf{X})}{W_2(\mathbf{X})}; \quad (15)$$

– по площади сечения стенки:

$$k_3 = \frac{f'_w + \Delta f}{f_w(\mathbf{X})}; \quad (16)$$

– по устойчивости настила стапель-палубы:

$$k_4 = \frac{x_{1-buckling}}{\max\{s_1, x_{1-buckling}, s_1^0\}}; \quad (17)$$

– по устойчивости стенки при сдвиге:

$$k_5 = \frac{x_{3-buckling-shearing}}{\max\{s_3, x_{3-buckling-compress}, x_{3-buckling-shearing}, s_3^0\}}; \quad (18)$$

– по устойчивости стенки при сжатии:

$$k_6 = \frac{x_{3-buckling-compress}}{\max\{s_3, x_{3-buckling-compress}, x_{3-buckling-shearing}, s_3^0\}}, \quad (19)$$

где $x_{1-buckling}$ – толщина настила стапель-палубы по требованию к устойчивости;
 $x_{3-buckling-shearing}$, $x_{3-buckling-compress}$ – толщины обшивки поперечной переборки по требованию к устойчивости при сдвиге и при сжатии соответственно.

Таблица 6

Результаты расчета и построечные толщины листовых конструкций

Название проекта	ПД-30	ПД-41	ПД-50
Коэффициент расчетного поперечного изгибающего момента	0,251	0,191	0,192
Коэффициент расчетного продольного изгибающего момента	0,087	0,063	0,063
Погонная доковая нагрузка, кН/м	1 189	2 863	2 907
Расчетный поперечный изгибающий момент, кН · м	135 275	152 796	215 112
Расчетный продольный изгибающий момент, кН · м	74 010	116 776	161 756
Расчетная перерезывающая сила в ДП, кН	8 292	7 729	11 336
Ширина присоединенных поясков поперечной переборки, м	7,5	3,6	5,2
Толщина настила стапель-палубы по требованию к устойчивости, мм	18,94	27,13	15,45
Толщина обшивки поперечной переборки по требованию к устойчивости			
При сдвиге, мм	10,09	10,45	12,84
При сжатии, мм	15,43	21,71	18,48
Момент сопротивления на уровне стапель-палубы			
Требуемый, м ³	0,946	0,923	1,096
Фактический, м ³	1,032	0,938	1,110
Момент сопротивления на уровне днища			
Требуемый, м ³	0,946	0,923	1,077
Фактический, м ³	1,007	0,924	1,077
Толщина обшивки поперечной переборки по требованию к поперечной прочности, мм	18,34	14,15	15,94
Добавка на износ к моменту сопротивления на уровне стапель-палубы, м ³	0,269	0,158	0,321
Добавка на износ к моменту сопротивления на уровне днища, м ³	0,269	0,158	0,302
Площадь сечения стенки			
Требуемая, см ²	1 018,0	1 046,9	1 052,1
Фактическая, см ²	1 018,0	1 606,4	1 219,8
Добавка на износ к площади сечения стенки, см ²	244,2	325,6	290,4
Максимальные нормальные напряжения на уровне стапель-палубы к концу срока службы дока (фактические)			
В МПа	177,4	195,8	272,5
В долях от нормативного предела текучести	0,755	0,833	0,835
Максимальные нормальные напряжения на уровне днища к концу срока службы дока (фактические)			
В МПа	183,4	199,4	277,4
В долях от нормативного предела текучести	0,781	0,849	0,850
Средние касательные напряжения в обшивке переборки к концу срока службы дока (фактические)			
В МПа	107,2	60,3	122,0
В долях от нормативного предела текучести	0,800	0,451	0,656
Коэффициенты использования нормативного ресурса поперечной прочности			
По моменту сопротивления на уровне стапель-палубы	0,917	0,984	0,987
По моменту сопротивления на уровне днища	0,940	0,999	1,000
По площади сечения стенки	1,000	0,652	0,862
По устойчивости стапель-палубы	0,961	0,973	0,941
По устойчивости стенки			
При сдвиге	0,550	0,481	0,695
При сжатии	0,841	1,000	1,000
Расчетные толщины листовых конструкций			
Стапель-палуба, мм	19,71	27,89	16,42
Обшивка днища, мм	18,94	27,13	21,20
Обшивка поперечной переборки, мм	18,34	21,71	18,48
Построечные толщины листовых конструкций, принятые в проекте			
Стапель-палуба, мм	22,0	24,5	23,0
Обшивка днища, мм	19,0	24,5	23,0
Обшивка поперечной переборки, мм	18,0	19,5	21,0

Плавающие доки пр. ПД-30, ПД-41, ПД-50 проектировались по требованиям Правил Российского морского регистра, действовавшим до 1990 г. Требования, которые использованы при компоновке задачи (1)–(10), заимствованы из Правил Регистра 2010 г. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Применение оптимизационных поисковых процедур – эффективный метод решения задачи проектирования конструкций понтона по требованиям к поперечной прочности.

2. Результаты поискового проектирования в целом неплохо соответствуют конструктивным решениям, принятым в проекте.

3. Существующие отличия связаны с принципиально различными подходами при назначении добавок на коррозионный износ в действующих Правилах и Правилах 1981–1990 гг., действовавших на момент постройки доков. Это обусловило не только различия в значениях толщин, но и их перераспределение между элементами, формирующими главные поперечные связи.

4. В некоторой степени различия связаны также с ужесточением требований к устойчивости листов настила стапель-палубы, обшивки днища и полотнища главных поперечных связей (особенно при подкреплении их только вертикальными стойками). Для всех трех доков коэффициенты использования нормативного ресурса по устойчивости стенки при сдвиге малы по сравнению с аналогичными характеристиками при сжатии.

5. Для доков с грузоподъемностью 30–80 тыс. т требования к поперечной прочности, как и требования к устойчивости при общем поперечном изгибе, являются одинаково важными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тряскин В. Н., Ле Минь Тху. Постановка задачи автоматизированного параметрического проектирования конструкции дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем поперечном изгибе // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. – № 2 (12). – С. 41–44.

2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 1. – СПб., 2010. – 482 с.

Статья поступила в редакцию 14.06.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ле Минь Тху – Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; тел.: 8 (8512) 614-166.

Le Minh Thu – Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of "Shipbuilding and Energetic Complexes of Sea Technological Equipment"; tel. 8 (8512) 614-166.