УДК 629.024; 629.5.017.2

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАТАМАРАННОГО ОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУДНА

Поздеев А.Г.¹, Кузнецова Ю.А.¹, Ржепкин А.Ю.¹

¹ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола, Россия (424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, e-mail: PozdeevAG@volgatech.net

Рассмотрены конструкции и материалы гибких оболочек, используемых при изготовлении понтонов плавучих оснований технологических судов, предназначенных для выполнения гидромеханизированных работ. Рассмотрена схема тонкостенной оболочки понтона и выполнен ее расчет в прикладной программной среде MathCAD на основе методики Е.Г. Макарова [4]. Вычислено распределение внутренних напряжений по длине оболочки для определения допускаемой толщины оболочки понтона. Построено распределение предельно допустимой толщины от внутреннего давления и радиальное перемещение точек оболочки. Расчеты могут быть выполнены для любых исходных параметров. Предложена конструкция катамаранного корпуса технологического судна с изменяемой геометрией. Изменение расстояния между двумя понтонными корпусами судна достигается посредством гидравлического пантографа. Рассмотрены поперечные и вертикальные колебания катамаранного основания. Программа расчета, реализованная в прикладной программной среде MathCAD, позволяет определить координаты центров тяжести поперечных сечений, моменты инерции относительно центральных осей, угол наклона главных осей симметрии и главные центральные моменты инерции понтонов плавучего основания. С использованием дифференциального уравнения поперечной качки с граничными и начальными условиями выполнен автоматизированный расчет угла, угловой скорости и ускорения для случая боковой качки и построено их распределение во времени.

Ключевые слова: катамаран, технологические суда, плавучее основание, композитный материал, понтоны из композитных материалов, гибкие материалы, прочность понтонного корпуса, гибкая оболочка, пантографический механизм, корпус судна с изменяемой геометрией, крен, поперечные колебания, остойчивость судна, автоматизированная методика расчета, параметры остойчивости при поперечной качке.

AUTOMATED CALCULATION PROCEDURE FOR CATAMARAN PLATFORM OF FLOATING PRODUCTION UNIT

Pozdeev A.G.¹, Kuznetsova Y.A.¹, Rzhepkin A.Y.¹

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia (424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3, e-mail: Pozdee-vAG@volgatech.net

Designs and materials of flexible shells are examined, which are used in the manufacture of pontoons of floating production units intended to carry out hydro-mechanical works. A scheme for a thin-walled shell of the pontoon is considered and its calculation is made in MathCAD application software environment, based on methodology of E.G. Makarov [4]. Distribution of internal stresses along the length of the shell is calculated to determine the permissible thickness of the pontoon shell. Distribution of maximum allowable thickness depending on the internal pressure and the radial displacement of points of the shell are built. Calculations can be made for any initial parameters. Design of the catamaran hull of the floating production unit with variable geometry is suggested. Change in the distance between two catamaran platform are considered. The calculation program, implemented in MathCAD application software environment, allows to determine the coordinates of centroids of crosssections, the moments of inertia with respect to the central axis, the inclinations of the principal symmetry axes, and the principal central moments of inertia of the floating platform pontoons. With the use of a differential equation of the lateral motion with boundary and initial conditions, automated calculation of the inclination, angular velocity and acceleration for lateral motions is made and their distribution in time is built.

Keywords: catamaran, floating production units, floating platform, composite material, pontoons made of composite materials, flexible materials, strength of the pontoon hull, flexible shell, pantograph mechanism, vessel hull with variable geometry, lurch, lateral motions, stability of the vessel, automated calculation procedure, parameters of stability in the presence of lateral motions.

Для изготовления понтонов при выполнении водно-технических и строительных работ на реках и акваториях могут быть использованы внутренние гибкие надувные оболочки [2]. При использовании внутренних гибких оболочек, заполняемых воздухом, размещаемых внутри корпуса, понтоны можно выполнять из легких сборных элементов, не требующих больших объемов сварочных работ при сборке и имеющих удобные для перевозки размеры. Для крупных понтонов не требуется изготовления прочных шпангоутов и рангоутов, так как боковые нагрузки на стенки корпуса будут небольшими. Для таких конструкций отпадает также важное требование: водонепроницаемость корпуса. Остойчивость понтонов при перевозке больших грузов и тяжелых механизмов достигается использованием схемы катамарана. Надежность внутренней гибкой оболочки, работающей под небольшим давлением, равным давлению столба воды, соответствующего осадке понтона, обеспечивается ее полной защищенностью от внешних воздействий. Осадка понтона может регулироваться путем регулирования давления во внутренней гибкой оболочке.

При выполнении гидромеханизированных работ с использованием крупных землесосных снарядов на территориях, расположенных далеко от водных путей, корпуса указанных земснарядов приходится выполнять в виде сборных секций, которые необходимо доставлять на место выполнения работ специальным наземным транспортом. На монтаж и демонтаж корпусов земснарядов приходится затрачивать много времени. При использовании внутренних гибких оболочек, корпуса земснарядов можно выполнять разборными.

Композиционные материалы получили широкое применение в производстве труб и трубопроводов. В настоящее время из полимерных композиционных материалов в мире производится более 200 тыс. тонн труб в год [3]. В отличие от традиционных материалов, композиты обладают более широким спектром физико-механических свойств, для них характерна ярко выраженная анизотропия. Эти особенности, свойственные современным композиционным материалам, предоставляют конструктору дополнительные возможности, позволяют целенаправленно формировать многообразные структуры и, тем самым, создавать материал с желаемыми свойствами. Композиционные материалы сочетают в себе высокую прочность с высокой вязкостью, или трещиностойкостью.

В работе предложена конструкция катамаранного основания технологического судна с изменяемой геометрией (рис. 1). Понтоны плавучего основания предлагается изготавливать из полимерных композиционных материалов. Работа направлена на внедрение автоматизированных методов расчета катамаранных оснований и их оболочек технологических судов различного назначения.



Рис. 1. Конструкция гидравлического пантографа системы связей между понтонами судна: 1 – понтоны; 2 – платформа; 3 – направляющие балки; 4 – механизм раздвижения понтонов

Катамаранный корпус технологического судна с изменяемой геометрией в транспортном положении должно иметь меньшее расстояние между понтонами по сравнению с его технологическим состоянием. Такие противоречивые требования можно удовлетворить, меняя расстояние между понтонами, например, с помощью механизма с направляющими балками [1]. Для изменения расположения понтонов 1, установленные на несущей платформе 2 балки 3 с помощью зубчато-реечного механизма раздвижения понтонов 4, приводятся в движение в необходимом направлении.

Автоматизированный расчет параметров тонкостенной оболочки корпуса технологического судна с изменяемой геометрией на основе гибких композитных материалов

В среде MathCAD произведем расчет оболочки корпуса технологического судна на основе гибких композитных материалов, состоящей из трех частей: конической, цилиндрической и сферической (рис. 2) [4].



Рис. 2. Схема конструкции оболочки понтона катамаранного корпуса судна

При заданных габаритных размерах и внутреннем давлении найдем толщину стенки. Размерности:

$$M \coloneqq m \qquad c_M \coloneqq 0.01 \cdot m \qquad MM \coloneqq 0.001 \cdot m$$
$$\kappa H \coloneqq 1000 \cdot N \qquad M\Pi a \coloneqq 10^6 \cdot \frac{N}{m^2} \qquad am_M \coloneqq 0.1 \cdot M\Pi a$$

Исходные данные:

$$r_0 := 50 c_M$$
 $\delta := 3 m_M$ $p := 1 a m_M$
 $L_{KOH} := 100 c_M$ $L_{IIIIJ} := 800 c_M$ $\sigma_{IOII} := 100 M \Pi a$

Заданное давление в оболочке p := 2 amm

Расчетный блок:

$$\alpha \coloneqq a \tan\left(\frac{r_0}{L_{KOH}}\right) \qquad \rho_t(y) \coloneqq \frac{r(y)}{\cos(\alpha)}$$
$$r(y) \coloneqq \left| \begin{matrix} r_0 \cdot \frac{y}{L_{KOH}} & -if - y \langle L_{KOH} \\ r_0 & -if - L_{KOH} \leq y \langle L_{KOH} + L_{IIIII} \\ \sqrt{\left|r_0^2 - \left[(y - L_{KOH}) - L_{IIHII}\right]^2\right|} & -otherwise$$

Нормальные напряжения в оболочке понтона судна:

– напряжения в тангенциальном направлении

$$\sigma_{t}(p, r_{0}, \delta, y) \coloneqq \begin{vmatrix} p \cdot \frac{\rho_{t}(y)}{\delta} & \text{if } y \langle L_{KOH} \\ p \cdot \frac{r_{0}}{\delta} & \text{if } L_{KOH} \leq y \langle L_{KOH} + L_{LIMI} \\ \frac{p \cdot r_{0}}{2 \cdot \delta} & \text{otherwise} \end{vmatrix}$$

– напряжения в меридиональном направлении

$$\sigma_{m}(p,r_{0},\delta,y) \coloneqq \begin{vmatrix} p \cdot \frac{\rho_{t}(y)}{2 \cdot \delta \cdot \cos(\alpha)} - if - y \langle L_{KOH} \\ p \cdot \frac{r_{0}}{2 \cdot \delta} - if - L_{KOH} \leq y \langle L_{KOH} + L_{LULT} \\ \frac{p \cdot r_{0}}{2 \cdot \delta} - otherwise \end{vmatrix}$$

Длина корпуса судна

$$L \coloneqq L_{KOH} + L_{LUNT} + r_0 \qquad \qquad L = 9.5 M \qquad \qquad y \coloneqq 0 \cdot cM, \frac{L}{50} \dots L$$

Эквивалентное напряжение по третьей гипотезе прочности

$$\sigma_{\mathfrak{I}}(p, r_0, \delta, y) \coloneqq \sigma_t(p, r_0, \delta, y)$$

Эквивалентное напряжение по четвертой гипотезе прочности

$$\sigma_{\Im}(p, r_{0}, \delta, y) \coloneqq \sqrt{\left|\sigma_{t}(p, r_{0}, \delta, y)^{2} + \sigma_{m}(p, r_{0}, \delta, y)^{2} - \sigma_{t}(p, r_{0}, \delta, y) \cdot \sigma_{m}(p, r_{0}, \delta, y)\right|}$$

$$\frac{\sigma_{t}(p, r_{0}, \delta, y)}{M\Pi a} \int_{0}^{20} \int_{0}^{10} \int_{0}^{0$$

Рис. 3. Распределения напряжений в тонкостенной оболочке по ее длине

$$Given_{\sigma_{\mathcal{I}}}(p,r_{0},\delta,L_{KOH}) - \sigma_{\mathcal{I}O\Pi} = 0$$
 $\sigma_{\mathcal{I}O\Pi}(p,r_{0}) \coloneqq Find(\delta)$

Допускаемая толщина оболочки при заданном давлении $\sigma_{\rm доп}(p,r_0) = 0.001 M$

$$Given_{\sigma_{\mathfrak{H}}}(p, r_{0}, \delta, L_{KOH}) - \sigma_{\mathcal{A}O\Pi} = 0 \qquad p_{\mathcal{A}O\Pi}(\delta, r_{0}) \coloneqq Find(p)$$

Допускаемое давление при заданной толщине оболочки

 $p := 0.1 \cdot amm, 0.2 \cdot amm...4 \cdot amm$

Результаты расчета параметров оболочки представлены в таблице 1 и рисунке 4.

Таблица 1

Параметр	Значение									
r ₀ _См	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\delta_{_{ДОП}}(3\cdot amm,r_0)_{_{}}MM$	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	1,05	1,2	1,35	1,5
р_атм	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$\delta_{_{\mathcal{Д} O \Pi}}(p, 50 \cdot cm)_{_{}}$ мм	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5

Результаты расчета параметров оболочки



Рис. 4. Зависимость предельно допустимой толщины оболочки

от внутреннего давления

Определим радиальное перемещение точек оболочки:

$$\mu \coloneqq 0.3 \qquad E \coloneqq 2 \cdot 10^5 M\Pi a \qquad p \coloneqq 5amm \qquad r_0 \coloneqq 20cm \qquad \delta \coloneqq \delta_{\mathcal{A}O\Pi}(p, r_0)$$

$$\Delta r(p, r_0, \delta, y) \coloneqq \frac{r_0}{E} \cdot (\sigma_t(p, r_0, \delta, y) - \mu \cdot \sigma_m(p, r_0, \delta, y)) \qquad \delta \coloneqq 1_{MM}$$

 $fmap(v) \coloneqq cyl2xyz(v_0, v_1, v_2)$ – переход к цилиндрическим координатам

Поверхность цилиндрической оболочки после деформации

$$K(y,\phi) \coloneqq \begin{pmatrix} \Delta r(p,r_0,\delta,y) \cdot 10^{2.8} + r(y) \\ \phi \\ y \end{pmatrix}$$

Поверхность цилиндрической оболочки до деформации

$$K_{1}(y,\phi) \coloneqq \begin{pmatrix} r(y) \\ \phi \\ y \end{pmatrix}$$
$$y \coloneqq 0 cm, \frac{L}{10} \dots L$$

Таблица 2

Результаты расчета радиального перемещения точек оболочки

Параметр	Значение параметра										
у_ <i>С</i> М	0	95	190	285	380	475	570	665	760	855	950
$\Delta r(p, r_0, \delta, y) _ MM$	0	0,221	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,085	0,035

Площадь распорного кольца для разгрузки оболочки от изгибающего момента, в месте перехода от конической к цилиндрической части оболочки, см²

Автоматизированный расчет геометрических характеристик плавучего основания из двух понтонов

Миделево сечение корпуса катамарана включает два понтона. Для каждого понтона вводится диаметр *d*, вычисляется площадь миделевого сечения понтонов *A*, вводится вектор координат центра тяжести *Y* и *Z*. Вводится код элемента *K*.

Исходные данные:

Диаметры сечений, $d := (1_1)^T$ м

Площади элементов S, $A := \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \frac{\pi \cdot d^2}{4}\right)^T$

Координаты центра тяжести элементов,

$$Y := (-2_2)^T M,$$

$$Z := (0.5_{-}-0.5)^T M$$

Код элементов $K := (1_2)^T$
 $K_1 = 1$ сечение сплошное $K_1 = -1$ отверстие
 $K_1 := (1_1)^T$ $n := rows(A)$
 $K = 1$ круг $i := 1...n$
 $K = 2$ круг

Расчетный модуль:

Моменты инерции элементов относительно собственных центральных осей

$$Jz_{i} \coloneqq \frac{\pi \cdot (d_{i})^{4}}{64} _ if _K_{i} = 1$$

$$Jz_{i} \coloneqq \frac{\pi \cdot (d_{i})^{4}}{64} _ if _K_{i} = 2$$

$$Jy_{i} \coloneqq \frac{\pi \cdot (d_{i})^{4}}{64} _ if _K_{i} = 2$$

$$0_ if _K_{i} > 2$$

$$Jy_{i} \coloneqq \frac{\pi \cdot (d_{i})^{4}}{64} _ if _K_{i} = 2$$

$$0_ if _K_{i} > 2$$

Координаты центра тяжести сечения, м

$$Y_{C} \coloneqq \frac{\sum_{j=1}^{n} (A_{j} \cdot Y_{j} \cdot K_{1j})}{\sum_{j=1}^{n} (A_{j} \cdot K_{1j})} \qquad Z_{C} \coloneqq \frac{\sum_{j=1}^{n} (A_{j} \cdot Y_{j} \cdot K_{1j})}{\sum_{j=1}^{n} (A_{j} \cdot K_{1j})} \qquad Y_{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad Z_{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Моменты инерции относительно центральных осей всего сечения, м⁴

$$J_{Z0} \coloneqq \sum_{j=1}^{n} \left[A_{j} \cdot (Y_{j} - Y_{C})^{2} \cdot K_{1j} \right] \qquad J_{Z0} = 13$$

$$J_{Y0} \coloneqq \sum_{j=1}^{n} \left[\left[J_{yj} + A_{j} \cdot (Z_{j} - Z_{C})^{2} \right] \cdot K_{1j} \right] \qquad J_{Y0} = 0.884$$

$$J_{ZY0} \coloneqq \sum_{j=1}^{n} \left[A_{j} \cdot (Y_{j} - Y_{C}) \cdot (Z_{j} - Z_{C}) \cdot K_{1j} \right] \qquad J_{ZY0} = \begin{pmatrix} -3.142 \\ -3.142 \end{pmatrix}$$

Угол наклона главных осей инерции, рад

$$\boldsymbol{\alpha}_{\Gamma,TAB} \coloneqq \frac{1}{2} \cdot a \tan\left(\frac{-2 \cdot J_{ZY0}}{J_{Z0} - J_{Y0}}\right) \qquad \qquad \boldsymbol{\alpha}_{\Gamma,TAB} = \begin{pmatrix} 0.247\\ 0.247 \end{pmatrix}$$

Главные центральные моменты инерции, м⁴

$$J_{MAX} \coloneqq \frac{J_{Z0} + J_{Y0}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(J_{Z0} - J_{Y0})^2 + 4 \cdot J_{ZY0}^2} \qquad J_{MAX} \coloneqq J_{MAX}^{T} \qquad J_{MAX}^{(1)} \coloneqq (13.358)$$
$$J_{MIN} \coloneqq \frac{J_{Z0} + J_{Y0}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(J_{Z0} - J_{Y0})^2 + 4 \cdot J_{ZY0}^2} \qquad J_{MIN} \coloneqq J_{MIN}^{T} \qquad J_{MIN}^{(1)} \coloneqq (0.092)$$

Автоматизированная методика расчета качки катамаранного судна

Катамаранная плавучая машина при якорном закреплении имеет возможность совершать лишь угловые перемещения около главных осей X и Y, проходящих через ее центр тяжести и совпадающих с плоскостями симметрии, и перемещаться вдоль вертикальной оси. Угловые перемещения машины около поперечной оси ее Y (дифферент) вызываются действием ветра и волнением поверхностного слоя воды. Максимальная длина волн в искусственных водохранилищах не превышает 5-6 м. При постановке катамаранного плавучего строения поперек таких волн число их на длине понтонов, равной 10 м, будет не менее двух. Это означает, что не может быть такого случая, когда одна из оконечностей плавучего основания окажется на подошве волны, другая – на ее гребне, следовательно, вынужденные колебания плавучего строения от таких волн будут малыми. Следовательно, из дифференциальных уравнений практическую ценность имеют лишь уравнения, выражающие вертикальные и поперечные перемещения (качки) плавучего строения. Отсюда заключаем, что катамаранное плавучее строение можно рассматривать как тело, имеющее лишь две степени свободы.

Произведем расчет поперечной качки катамаранного технологического судна, считая вынужденные продольные колебания (дифферент) от ветровых волн, развиваемых на водохранилищах, малой величиной. Основными при расчете являются поперечные (крен) и вертикальные колебания. В основу расчета положены зависимости, представленные в работе Г.К. Сокольского [5].

Исходные данные:

Плотность воды, $\rho := 1000 \, \text{кг/m}^3$

g := 9.81

Координаты центра тяжести элементов, $Y_{1,1} = -2$ м

Осадка левого понтона, $\alpha_{\Gamma Л A B_{1,1}} = 0.247$ м

$$Z_{1.1} = 0.5$$

Расчетный модуль:

Кренящий момент, Н м

$$M_{\kappa p} := (Z_1)^2 A_1 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha_{\Gamma \pi A B 1, 1}) \qquad M_{\kappa p} := M_{\kappa p}^{-1} \qquad M_{\kappa p}^{-(1)} = (470.423)$$

Дифференциальное уравнение поперечной качки с граничными и начальными условиями

$$d \coloneqq 1 \qquad \qquad \alpha \coloneqq \alpha_{\Gamma TAB1,1} \qquad \qquad J^{(1)} \coloneqq J_{MAX}^{T} \qquad \qquad J \coloneqq J_{1,1}$$

Given

$$\frac{d^2}{dt^2}\alpha(t) + \frac{(Z_1)^2 \pi \cdot d \cdot \rho \cdot g}{4 \cdot J} \cdot \alpha(t) = 0 \qquad \alpha(0) = \alpha \qquad \frac{d}{dt}\alpha(0) = -2 \cdot 10^3$$

$$\alpha(t) \coloneqq Odesolve(t, Z)$$

С учетом амплитуды колебаний $a = a_{\Gamma Л A B 1,1}$ решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$d \coloneqq 1 \qquad \qquad \alpha \coloneqq \alpha_{\Gamma J A B 1, 1}$$
$$J^{(1)} \coloneqq J_{MAX}^{T} \qquad \qquad J \coloneqq J_{1, 1}$$
$$\alpha(t) \coloneqq \alpha_{\Gamma J A B 1, 1} \cdot \cos \left[\sqrt{\frac{(Z_1)^2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho \cdot g}{4 \cdot J}} \cdot t + \alpha \right]$$

t := 0, 0.5...100



Рис. 6. Изменение угла, угловой скорости и ускорения поперечных колебаний от времени

Выводы

1. Разработана автоматизированная методика расчета тонкостенной оболочки корпуса технологического судна с изменяемой геометрией на основе гибких композитных материалов в среде MathCAD, позволяющая определить необходимую толщину оболочки при заданном внутреннем давлении и геометрических характеристиках.

2. Автоматизированный расчет геометрических характеристик плавучего основания из двух понтонов позволяет определить координаты центров тяжести поперечных сечений,

моменты инерции относительно центральных осей, угол наклона главных осей симметрии и главные центральные моменты инерции понтонов плавучего основания.

3. Представленная автоматизированная методика расчета поперечной качки катамаранного технологического судна на основе дифференциального уравнения поперечной качки с граничными и начальными условиями позволяет определить угол, угловую скорость и ускорения качки. Аналогичный расчетный модуль может быть получен для случаев вертикальных и продольных колебаний.

Список литературы

1. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике: Справочное пособие. В 7 т.

– Т. І: Элементы механизмов. Простейшие рычажные и шарнирно-рычажные механизмы. – 2-е изд., переработанное. – М.; «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1979 – 496 с.

Бройд, И.И. Нетрадиционные гидравлические прикладные задачи и технологии/ Бройд,
 И.И. – Научное издание: – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 256 с.

Куликов Ю.А. Механика трубопроводов из армированных пластиков: Монография/
 Ю.А. Куликов, Ю.В. Лоскутов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 156 с.

4. Макаров, Е.Г. Сопротивление материалов на базе MathCad/ Е.Г. Макаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.

5. Сокольский, Г.К. К вопросу качки катамаранной плавучей погрузочной машины/ Г.К.Сокольский // Труды ВКНИИВОЛТ. Выпуск IX. – М.: Лесная промышленность, 1969. – С. 14-18.

Рецензенты:

Полянин И.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой транспортно-технологических машин, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола;

Царев Е.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и оборудования лесопромышленных производств ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.