

УДК 622.272: 516.02

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПОНТОНОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ**

С. В. Черданцев

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: svch01@yandex.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия*

На основе фундаментальных положений теории корабля исследована плавучесть понтонов, используемых на угольных разрезах, и найдена безопасная величина их надводной части. Получены формулы для определения метацентрических высот, с помощью которых выполнен анализ устойчивости понтонов.

Понтоны, плавучесть, кренящий и восстанавливающий моменты, устойчивость

Технология разработки угольных месторождений открытым способом предусматривает наличие зумпфа для стока грунтовых и подземных вод. По мере его заполнения воду откачивают, чтобы не допустить затопления забоя. Для этого используют плавучие водоотливные установки (ПВУ), помещаемые непосредственно в зумпфах и представляющие собой плавучие средства (ПС) в виде понтонов с установленным на них водоотливным оборудованием (ВО).

К настоящему моменту понтоны проектируются на каждом угольном разрезе индивидуально, конструкции их можно условно разделить на два типа. К первому типу принадлежат понтоны (рис. 1а, б), в которых металлические трубы-поплавки, герметически заваренные с торцов, расположены параллельно друг другу. В зависимости от производительности водоотливного оборудования используют нечетное количество поплавков (чаще 3, 5), на которые с помощью сварки настилают палубу из металлических пластин, обшитых досками, и боковые ограждения. Используя крепежные средства, на палубу устанавливают насосное оборудование с электроприводом. В понтонах второго типа металлические трубы-поплавки расположены по контуру прямоугольника, а палуба, боковые ограждения, насосное оборудование и электропривод устанавливают так же, как и в конструкциях первого типа. В конструкциях понтонов обоих типов все оборудование на них размещают таким образом, чтобы ПВУ обладала хотя бы одной вертикальной плоскостью симметрии.

Расчет любого понтона на разрезе, вне зависимости от конструкции, сводится лишь к обеспечению его плавучести, т. е. способности понтона находиться на воде в равновесии без опоры. Анализ поведения понтонов под действием внешних возмущающих сил в расчетах вообще не рассматривается.

Частично эта проблема обсуждалась в связи с расследованием несчастного случая, произошедшего на разрезе “Междуреченский” ОАО “Междуречье” при эксплуатации плавучей водоотливной установки в марте 2001 г. [1].

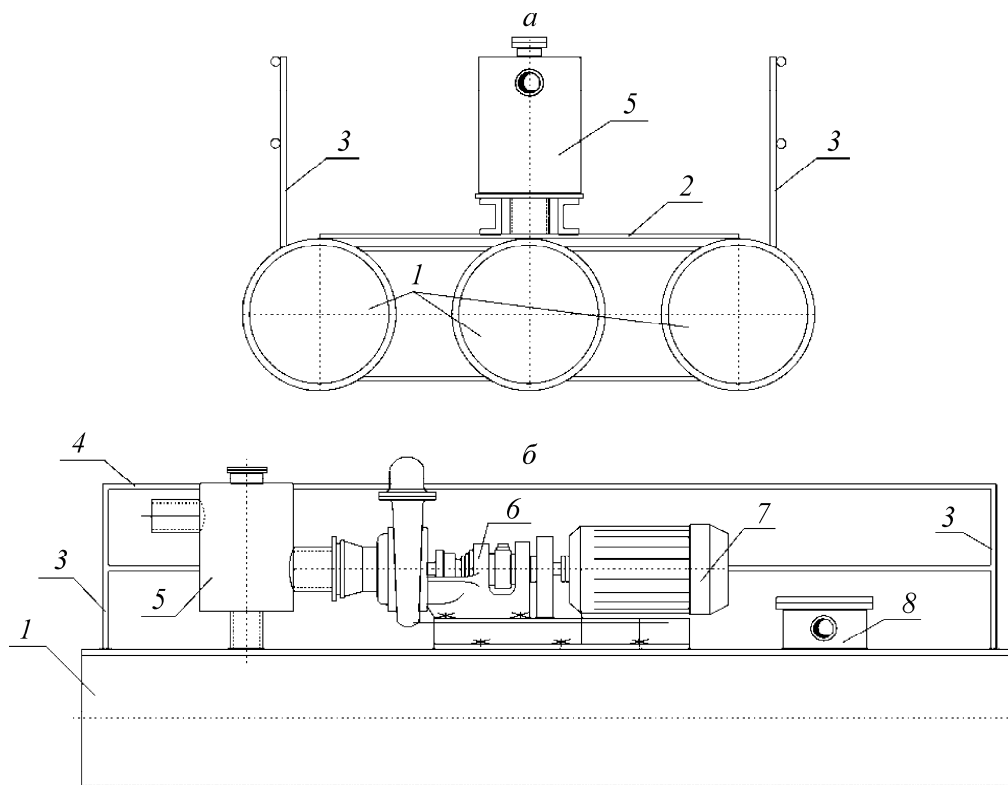


Рис. 1. Плавающая водоотливная установка *a* (вид с торца): 1 — металлические трубы-поплавки; 2 — палубный настил; 3 — ограждения; 4 — поручни; 5 — бак-запасник воды; *б* (вид сбоку): 6 — насос; 7 — электродвигатель; 8 — ящик для кабеля

В работе [1] расчетная схема понтона, представляющая собой трехсвязную плавающую область, заменена эквивалентной односвязной областью и с позиций теоретической механики [2, 3] выполнен анализ ее плавучести и устойчивости. В результате чего была установлена причина несчастного случая.

В данной работе предпринята попытка выявить плавучесть и остойчивость понтонов, применяемых на разрезах, с общих позиций статики корабля [4–6], не прибегая к замене понтона эквивалентной односвязной областью.

В отличие от понятия устойчивости, используемого в теоретической механике, остойчивость имеет меру, т. е. может быть большой или малой [4–6], а устойчивость характеризует только качественное состояние [2, 3]. Устойчивость может быть безразличной, а безразличной остойчивости не бывает, так как в этом случае любое плавучее средство не возвращается в положение равновесия после прекращения внешнего воздействия, т. е. является нестойчивым.

Предположим, что ПВУ не совершает никаких движений, или совершает их настолько медленно, что можно пренебречь инерцией окружающей воды и ее сопротивлением. В этом случае на понтон будут действовать: его собственный вес, вес водоотливного оборудования и грузов на понтоне (включая рабочих), которые приводятся к одной равнодействующей — силе тяжести P , направленной вертикально вниз и приложенной в центре тяжести (ЦТ) G плавучей водоотливной установки

$$P = Mg, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения. Массу M плавучей водоотливной установки находим суммированием масс m_i всех частей понтона, механизмов, устройств, оборудования и грузов, составляющих ПВУ:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i,$$

где n — число слагаемых.

Выберем правостороннюю декартовую систему координат с началом в точке O следующим образом (рис. 2). Ось Ox поместим в продольной вертикальной плоскости понтона, являющейся плоскостью его симметрии, Oy направим через центр тяжести срединного поперечного сечения понтона, а ось Oz — вертикально вверх.

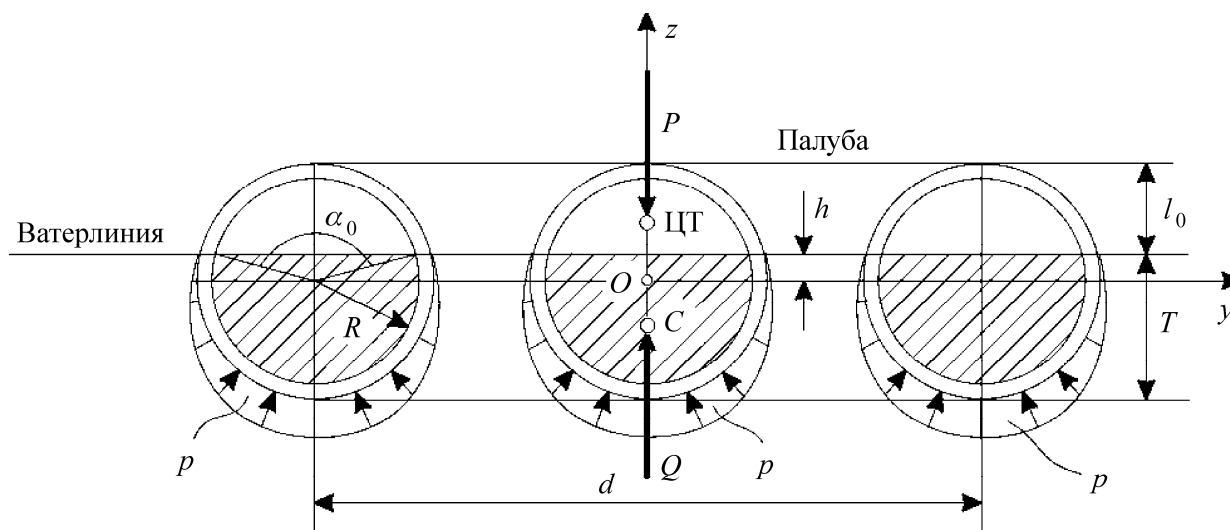


Рис. 2. К определению архимедовой силы

Тогда координаты центра тяжести x_G, y_G, z_G могут быть определены по формулам

$$x_G = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i x_i, \quad y_G = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i y_i, \quad z_G = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i z_i. \quad (2)$$

где x_i, y_i, z_i — координаты массы m_i , составляющей ПВУ. Из (1) и (2) видим, что центр масс ПВУ совпадает с ее ЦТ.

Со стороны воды на каждый элемент смоченной поверхности понтона действует по нормали гидростатическое давление p , равнодействующая которой Q , называемая силой плавучести, приложена в центре тяжести C погруженного объема, называемого центром величины (ЦВ), и направлена вертикально вверх (см. рис. 2). Согласно закону Архимеда сила плавучести равна силе тяжести воды в объеме V_1 погруженной в воду части понтона

$$Q = \rho g V_1,$$

где ρ — плотность воды в зумпфе. Отметим, что величину V_1 называют объемным водоизмещением, а линию, отделяющую надводную часть понтона от его погруженной части, называют ватерлинией.

Для равновесия понтона необходимо, чтобы главный вектор и главный момент всех сил были равны нулю. Из первого условия $Q - P = 0$ получаем уравнение плавучести

$$P = \rho g V_1, \quad (3)$$

а на основе второго условия заключаем, что ЦВ должен находиться на одной вертикали с ЦТ.

Любое плавучее средство должно иметь запас плавучести [4–6], что обеспечивается объемом непроницаемой для воды его надводной части V_n , расположенной выше ватерлинии. Выраженный в долях объемного водоизмещения, коэффициент запаса плавучести k_n должен составлять не менее 0.3.

Зная силу тяжести P , из уравнения (3) определяем объемное водоизмещение

$$V_1 = \frac{P}{\rho g}$$

и, задавая запас плавучести k_n , находим объем V_0 поплавок понтона:

$$V_0 = V_1 + V_i = V_1 + k_n V_1 = (1 + k_n) V_1 = (1 + k_n) \frac{P}{\rho g}. \quad (4)$$

С другой стороны, объем понтона можно находить по формуле

$$V_0 = j \pi R^2 L,$$

где j — число поплавков; R — внутренний радиус каждого поплавок; L — длина поплавков понтона.

Сопоставляя ее с (4), имеем $j \pi R^2 L = (1 + k_n) \frac{P}{\rho g}$, откуда находим длину поплавков понтона L

$$L = \frac{(1 + k_n) P}{j \pi R^2 \rho g}. \quad (5)$$

Объемное водоизмещение понтона можно вычислять по формуле

$$V_1 = j A_1^{(1)} L, \quad (6)$$

где площадь поперечного сечения, находящегося под водой одного поплавка $A_1^{(1)}$ определяется (рис. 3) как разность всей площади поперечного сечения одного поплавка $A_0^{(1)}$ и площади сечения его надводной части

$$A_1^{(1)} = A_0^{(1)} - A_i^{(1)}. \quad (7)$$

Учитывая, что $A_1^{(1)} = A_i^{(1)} / k_n$, получаем уравнение

$$A_0^{(1)} - \frac{k_n + 1}{k_n} A_i^{(1)} = 0, \quad (8)$$

в котором $A_0^{(1)} = \pi R^2$, а площадь $A_i^{(1)}$ (рис. 3) найдем по формуле

$$A_i^{(1)} = \int_{A_i^{(1)}} dA = 2 \int_{A_i^{(1)}} y dz = 2 \int_h^R \sqrt{R^2 - z^2} dz,$$

преобразуемую после интегрирования:

$$A_i^{(1)} = R^2 [\arccos(1 - \zeta) - (1 - \zeta) \sqrt{\zeta(2 - \zeta)}], \quad (9)$$

где $\zeta = l_0 / R$ — относительная максимальная высота надводной части поплавков.

В силу формулы (9), уравнение (8) приводится к трансцендентному виду

$$\arccos(1 - \zeta) - (1 - \zeta) \sqrt{\zeta(2 - \zeta)} = \frac{\pi k_n}{k_n + 1}, \quad (10)$$

решение которого зависит от величины $k_{\text{п}}$. Так, при $k_{\text{п}} = 0.3$ величина $\zeta = 0.5627$, при $k_{\text{п}} = 0.5$: $\zeta = 0.7351$ и т. д.

Зная ζ (см. рис. 3), находим размер

$$b = 2\sqrt{R^2 - h^2} = 2R\sqrt{\zeta(2 - \zeta)}. \quad (11)$$

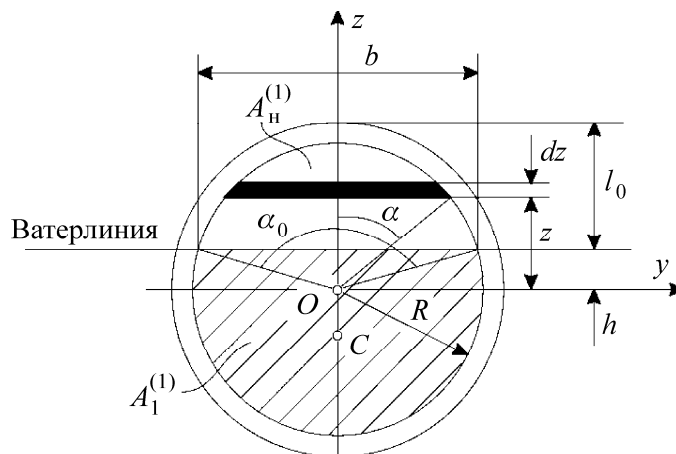


Рис. 3. К определению площади и статического момента надводной части понтона

Положение ЦВ (на рис. 3 точка C) может быть найдено как положение центра тяжести подводной части $A_1^{(1)}$ [2, 3]

$$z_C = \frac{S_0^{(y)} - S_i^{(y)}}{A_0^{(1)} - A_i^{(1)}}, \quad (12)$$

где $S_0^{(y)}$, $S_i^{(y)}$ — статические моменты относительно оси y соответственно всего поперечного сечения поплавка и его надводной части. Поскольку в (12) $S_0^{(y)} = 0$, а $S_i^{(y)}$ вычисляется по формуле

$$S_i^{(y)} = \int_{A_i^{(1)}} z dA = 2 \int_h^R z y dz = 2 \int_h^R z \sqrt{R^2 - z^2} dz,$$

которая после интегрирования имеет вид

$$S_i^{(y)} = \frac{2}{3} R^3 [\zeta(2 - \zeta)]^{3/2},$$

то (12) будет выглядеть следующим образом:

$$z_C = -\frac{2}{3} R \frac{[\zeta(2 - \zeta)]^{3/2}}{\pi - [\arccos(1 - \zeta) - (1 - \zeta)\sqrt{\zeta(2 - \zeta)}]} \quad (13)$$

и при $\zeta = 0.5627$ величина $z_C = -0.201R$.

Дальнейший расчет понтона связан с исследованием его остойчивости, т. е. способности возвращаться в положение равновесия после прекращения внешних воздействий, которыми понтон был выведены из этого положения.

Перемещаясь вдоль оси Oz , понтон с необходимым запасом плавучести всегда устойчив, и лишь в аварийных случаях при приеме чрезмерного количества груза понтон может потерять вертикальную устойчивость и утонуть. При наклонениях относительно осей, параллельных Ox (крен) и Oy (дифферент), понтон может быть устойчивым или неустойчивым, что зависит от его размеров, распределения весовой нагрузки, величины наклонения и т. д. При крене на малый угол $\delta\theta$ (рис. 4) ватерлиния из положения $ВЛ_0$ перейдет в положение $ВЛ_\theta$.

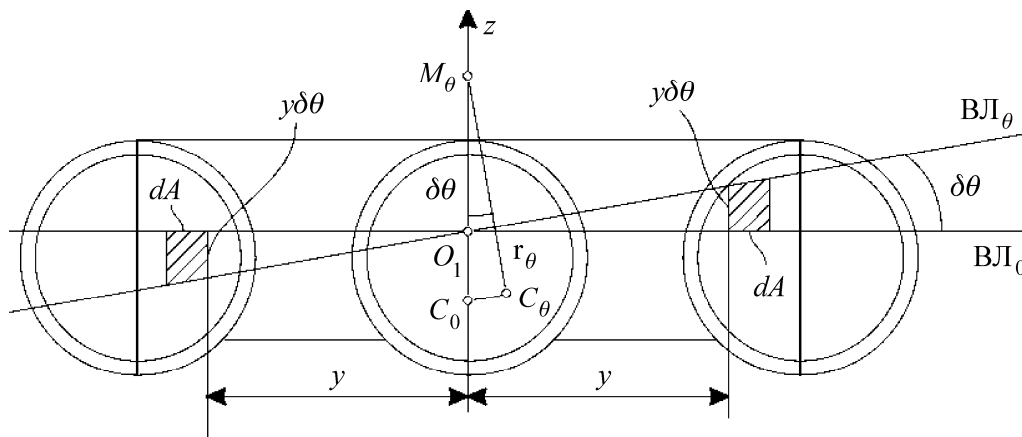


Рис. 4. Поперечный метацентр и поперечный метацентрический радиус

На основании теоремы Эйлера [4–6] при небольших наклонениях плавучего средства водоизмещение не меняется и значит величина погруженного объема остается неизменной. Поэтому входящий δV_{II} и выходящий δV_{I} объемы равны между собой. Следовательно, можно утверждать, что линия пересечения двух равнообъемных ватерлиний при малом отклонении проходит через центры тяжести обеих ватерлиний, совпадающие с точкой O_1 , относительно которой и будет происходить поворот ватерлиний (рис. 4).

При малых наклонениях понтона величина погруженного объема остается неизменной, но меняется его форма, вследствие чего изменяется положение ЦВ (рис. 4). Он переместится из точки C_0 в точку C_θ по дуге $C_0 C_\theta$.

Определим объем элементарной призмы и положение ее центра тяжести

$$d(\delta V) = y \delta \theta dA.$$

Изменение статических моментов от изменения формы подводного объема в результате добавления с правого борта объема $d(\delta V)$ будет

$$d(\delta S_z) = d(\delta V)y = \delta \theta y^2 dA, \quad d(\delta S_y) = d(\delta V)z = y \delta \theta dA \frac{1}{2} y \delta \theta = \frac{(\delta \theta)^2}{2} y^2 dA$$

и, таким образом, суммарное изменение статических моментов находим посредством следующих формул:

$$\delta S_z = \delta \theta \int_A y^2 dA, \quad \delta S_y = \frac{(\delta \theta)^2}{2} \int_A y^2 dA, \quad (14)$$

где A — площадь ватерлинии.

С другой стороны, при смещении центра величины из положения C_0 в положение C_θ статические моменты объема погруженной части судна относительно осей, параллельных осям Ox и Oy , можно определить как

$$\delta S_z = V_1 \delta y_C, \quad \delta S_y = V_1 \delta z_C. \quad (15)$$

Сопоставляя формулы (14) и (15), имеем

$$\delta y_C = \frac{\delta \theta}{V_1} \int_A y^2 dA, \quad \delta z_C = \frac{(\delta \theta)^2}{2V_1} \int_A y^2 dA. \quad (16)$$

Поскольку в формулах (16) $\int_A y^2 dA = I_{x_1}$ является моментом инерции площади ватерлинии относительно продольной оси O_1x_1 , параллельной оси Ox , то (16) перепишем в виде

$$\delta y_C = \frac{I_{x_1}}{V_1} \delta \theta, \quad \delta z_C = \frac{I_{x_1}}{V_1} \frac{(\delta \theta)^2}{2}.$$

Поэтому длину дуги кривой C_0C_θ определим с помощью формулы

$$\delta l_C = \sqrt{(\delta y_C)^2 + (\delta z_C)^2} = \frac{I_{x_1}}{V_1} \delta \theta \sqrt{1 + \frac{(\delta \theta)^4}{4}} \approx \frac{I_{x_1}}{V_1} \delta \theta, \quad (17)$$

где, ввиду малости угла крена $\delta \theta$, пренебрегаем величиной $(\delta \theta)^4 / 4$ по сравнению с единицей.

Кривизну дуги C_0C_θ , центр которой находится в точке M_θ (рис. 4), называемой поперечным метацентром, будем характеризовать поперечным метацентрическим радиусом

$$r_\theta = \frac{\delta l_C}{\delta \theta},$$

который, в силу формулы (17), можно переписать как

$$r_\theta = \frac{I_{x_1}}{V_1}. \quad (18)$$

Аналогично, рассматривая дифферент понтона на малый угол $\delta \psi$, найдем продольный метацентрический радиус кривизны

$$r_\psi = \frac{I_{y_1}}{V_1}, \quad (19)$$

определив положение продольного метацентра M_ψ , являющегося центром кривизны траектории C_0C_ψ .

Поскольку площадь ватерлинии представляет собой фигуру, состоящую из j прямоугольников, каждый из которых имеет площадь

$$F = bL,$$

то моменты инерции площади ватерлинии I_{x_1} , I_{y_1} относительно осей O_1x_1 , O_1y_1 (ось O_1y_1 совпадает с ватерлинией ВЛ₀) можно установить по известным формулам сопротивления материалов [7, 8]

$$I_{x_1} = j \frac{b^3 L}{12} + 2 \sum_{i=1}^q \left[bL \left(\frac{d}{2} - (i-1)d_1 \right)^2 \right], \quad I_{y_1} = j \frac{bL^3}{12}, \quad (20)$$

где d — расстояние между центрами тяжести крайних поплавков; $d_1 = d/(j-1)$ — расстояние между центрами тяжести двух соседних поплавков; $q = (j-1)/2$ — количество поплавков (начиная с крайнего), находящихся по одну сторону от центрального поплавка.

В силу формул (6), (7), (9) и (20), формулы (18) и (19) преобразуются к виду

$$r_\theta = R \frac{2[\sqrt{\zeta(2-\zeta)}]^3 \left[1 + \frac{3\delta^2}{2j\zeta(2-\zeta)} \sum_{i=1}^{(j-1)/2} \left(1 - (i-1) \frac{2}{j-1} \right)^2 \right]}{3\{\pi - [\arccos(1-\zeta) - (1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}]\}}, \quad (21)$$

$$r_\psi = R \frac{\sqrt{\zeta(2-\zeta)}}{6\{\pi - [\arccos(1-\zeta) - (1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}]\}} \left(\frac{L}{R} \right)^2, \quad (22)$$

где $\delta = d/R$ — относительное расстояние между центрами тяжести крайних поплавков.

В конструкциях понтонов первого типа с тремя поплавками, как правило, $\delta = 3.5$, $L/R = 14.5$. Полагая, что $\zeta = 0.5627$, по формулам (21) и (22) найдем $r_\theta = 1.784R$, $r_\psi = 13.04R$.

При равнообъемном наклонении кренящим моментом $M_{кр}$ центр тяжести понтона не меняет своего положения, а центр влияния перемещается в сторону наклона. Вес P и архимедова сила Q образуют пару (рис. 5), плечо которой f является плечом статической остойчивости.

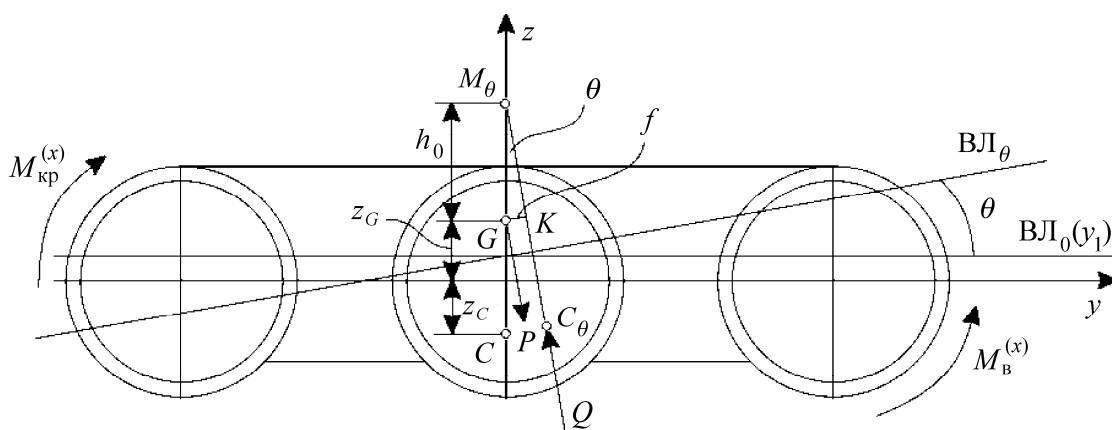


Рис. 5. Кренящий $M_{кр}^{(x)}$ и восстанавливающий $M_B^{(x)}$ моменты относительно оси O_1x_1

Его величину определим из прямоугольного треугольника MGK по формуле

$$f = h_0 \theta, \quad (23)$$

в которой учтено, что при малых углах крена $\sin \theta \cong \theta$, а h_0 — поперечная метацентрическая высота. Тогда восстанавливающий момент

$$M_B^{(x)} = Pf = Ph_0 \theta, \quad (24)$$

причем его величина тем больше, чем больше метацентрическая высота h_0 .

Аналогично, при дифференте понтона возникает восстанавливающий момент

$$M_B^{(y)} = PH_0 \psi, \quad (25)$$

где ψ — угол дифферента, H_0 — продольная метацентрическая высота.

Формулы (24) и (25) показывают, что чем больше метацентрические высоты h_0 и H_0 при данном водоизмещении, тем больше восстанавливающие моменты и, значит, больше начальная остойчивость понтона. Следовательно, метацентрические высоты h_0 и H_0 могут служить мерой остойчивости понтонов.

Поскольку метацентрическую высоту h_0 находится по формуле (рис. 5)

$$h_0 = r_\theta - |z_C| - z_G,$$

то можно оценить и остойчивость 3-х поплавкового понтона ($\zeta = 0.5627$), центр тяжести которого $z_G = 0.474R$, а остальные параметры вычислены ранее: $z_C = -0.201R$, $r_\theta = 1.784R$, $r_\psi = 13.04R$. Тогда $h_0 = 1.109R$ и, значит, понтон при малых углах крена остойчив.

При малых углах дифферента

$$H_0 = r_\psi - |z_C| - z_G = 12.365R$$

и, следовательно, понтон также остойчив.

Если принять $\eta = H_0 / h_0$, то при малых углах дифферента начальная остойчивость рассмотренного понтона в $\eta = 11.15$ раза выше его начальной остойчивости при малых углах крена.

ВЫВОДЫ

1. Выведено трансцендентное уравнение, решение которого позволяет вычислить максимальную высоту надводной части понтона при заданном запасе его плавучести.

2. Получены аналитические формулы для определения положения центра величины и вычисления метацентрических радиусов.

3. Найдены метацентрические высоты, являющиеся мерой начальной остойчивости понтонов, используемых на разрезах.

4. Установлено, что начальная остойчивость конструкций понтонов первого типа при малом дифференте значительно выше их начальной остойчивости при малом крене.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучер Н. А., Черданцев С. В., Протасов С. И., Подображин С. Н., Билибин В. В. Условия безопасного применения плавучих водоотливных установок // Безопасность труда в промышленности. — 2003. — № 1.
2. Жуковский Н. Е. Теоретическая механика. — М.: Гостехиздат, 1952.
3. Аппель П. Теоретическая механика. Т. 1: Статика. Динамика точки // Перевод с фр. изд. — М.: Физматгиз, 1960.
4. Борисов Р. В., Луговский В. В., Мирохин Б. М., Рождественский В. В. Статика корабля. — СПб.: Судостроение, 2005.
5. Семенов-Тянь-Шанский В. В. Статика и динамика корабля. — Л.: Судостроение, 1973.
6. Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Том 1: Статика корабля. — Л.: Судостроение, 1976.
7. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Соппротивление материалов. — М.: Высш. шк., 1975.
8. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. — М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию 17/XII 2012