

УДК 622.272: 516.02

Н.В. Черданцев, С.В. Черданцев

ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОНТОНОВ В ЗУМПФАХ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ КРЕНА

При разработке угольных месторождений открытым способом для сбора грунтовых и подземных вод сооружают углубления в виде зумпфов, в которых устанавливают понтоны, с размещаемым на них водоотливным оборудованием.

Понтон представляет собой конструкцию, основой которой является система металлических параллельных друг к другу труб-поплавков, герметически заваренных с торцов (рис. 1). В зависимости от производительности водоотливного оборудования в конструкции понтонов используются, как правило, три или пять поплавков.

В настоящее время в основе проектирования понтонов на угольных разрезах лежит расчет только их плавучести. Однако для безопасной эксплуатации понтонов необходимы также исследования их остойчивости.

Под остойчивостью плавучего средства понимают его способность сохранять исходное состояние равновесия и при наклонениях (кренах или дифферентах) возвращаться к исходному состоянию. Причем, за критерий остойчивости принимают величины поперечной и продольной метацентрических высот.

В работах [1, 2] исследована остойчивость понтонов при малых углах крена. В работе [3, 4] сформулирована задача о движении понтона, в ходе решения которой установлено, что понтон в зумпфе угольного разреза совершает периодические движения, представляющие собой вертикальную, боковую и килевую качки, происходящие независимо друг от друга.

Здесь обсуждается задача об остойчивости понтона при условии, что его угол крена может принимать, не только малые значения. Иначе говоря, мы будем рассматривать остойчивость понтона на больших углах крена.

Как известно [5, 6], для равновесия любого плавучего средства (ПС) необходимо, чтобы главный вектор и главный момент всех сил, действующих на него, были равны нулю. Сила тяжести установки P приложена в центре её тяжести (ЦТ), а архимедова сила Q сосредоточена в центре тяжести погруженного объема, называемого центром величины (ЦВ). Из первого условия равновесия понтона следует условие плавучести $Q = P$, а на основе второго условия следует, что ЦВ должен находиться на одной вертикальной линии с ЦТ.

При малых наклонениях понтона, вызванных действием кренящего момента $M_{кр}$, ватерлиния в соответствии с теоремой Эйлера [5], поворачивается вокруг своего центра тяжести таким образом,

что величина погруженного объема остается неизменной, но меняется его форма, вследствие чего изменяется положение ЦВ (рис. 2). Он перемещается из точки C_0 в точку C_θ по дуге C_0C_θ , поворачиваясь вокруг точки M_0 , расположенной на оси z и называемой поперечным метацентром. Расстояние от метацентра до ЦВ является метацентрическим радиусом r_θ и согласно [5] он связан с объемом погруженной части понтона зависимостью

$$r_\theta \cong r_0 = \frac{I_{x_1}}{V_1}, \quad (1)$$

где I_{x_1} – момент инерции площади ватерлинии относительно продольной оси O_1x_1 , параллельной оси Ox , определяемый как

$$I_{x_1} = \int_A y^2 dA. \quad (2)$$

В формуле (2) интегрирование ведётся по площади ватерлинии, представляющей собой сумму площадей нескольких прямоугольников. Длина каждого прямоугольника равна длине поплавка L , а ширина – длине отрезка, являющегося следом пересечения ватерлинии с торцом поплавка (на рис. 2 отрезки расположены горизонтально и отмечены жирной линией).

При малом угле крена, при котором $\sin\theta \cong \theta$, понтона силы P и Q (рис. 2) создают восстанавливающий момент [5]

$$M_B = Q \cdot h_0 \cdot \sin\theta \cong Q \cdot h_0 \cdot \theta, \quad (3)$$

противоположный кренящему моменту. В формуле (3) h_0 – поперечная метацентрическая высота, определяемая (рис. 2) по формуле

$$h_0 = r_0 + z_c - a,$$

а произведение h_0 на угол θ является плечом статической остойчивости при малом крене.

При больших углах величина r_θ зависит от момента инерции площади ватерлинии и меняется при повороте на произвольный угол θ . Поэтому формулу (1) следует записать в виде

$$r_\theta = \frac{I_{x\theta}}{V_1}, \quad (4)$$

где $I_{x\theta}$ – момент инерции площади ватерлинии относительно центральной оси, параллельной оси x_1 , при произвольном угле крена понтона.

Для вычисления $I_{x\theta}$ вначале находим положение центра тяжести двух отрезков (на рис. 2 – они

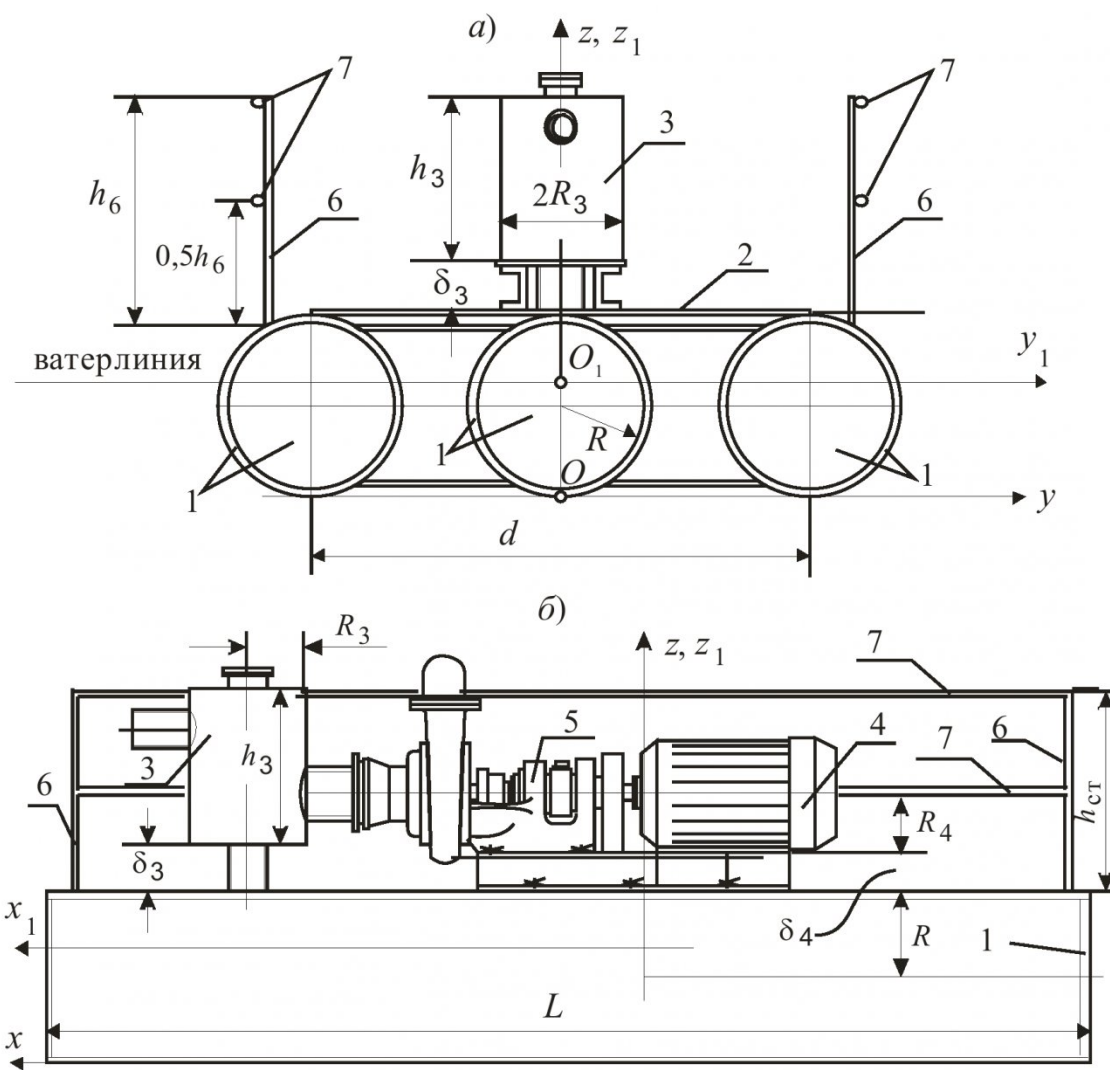


Рис. 1. Схема плавучей водоотливной установки в двух видах: а) вид с торца, б) вид сбоку. 1 – металлические трубы-поплавки; 2 – палубный настил; 3 – бак-запасник воды ограждения; 4 – электродвигатель; 5 – насос; 6 – стойки ограждения; 7 – поручни

показаны жирными наклонными линиями). Затем, вычисляем собственные моменты инерции прямоугольника и, учитывая теорему о вычислении моментов инерции при параллельном переносе осей [7], находим момент инерции площади ватерлинии относительно её центральной продольной оси. При повороте ватерлинии на произвольный угол значительно меняется момент инерции её площади.

В связи с этим существенно меняется и величина метацентрического радиуса r_θ . Изменение же что, в свою очередь, приводит к изменению положения ЦВ и метacentра, а также изменяет и плечо статической остойчивости l_θ .

Для определения положения ЦВ находим сначала бесконечно малые перемещения ЦВ (рис. 3)

$$dy = C_\theta C_{\theta_1} \cdot \cos \theta = r_\theta \cdot d\theta \cdot \cos \theta,$$

$$dz = C_\theta C_{\theta_1} \cdot \sin \theta = r_\theta \cdot d\theta \cdot \sin \theta$$

интегрируя которые мы получаем формулы для

вычисления координат ЦВ

$$y_\theta = \int_0^\theta r_\theta \cos \theta d\theta, \quad z_\theta - z_c = \int_0^\theta r_\theta \sin \theta d\theta \quad (5)$$

Из анализа рис.3 мы находим координаты метacentра

$$y_m = y_\theta - r_\theta \sin \theta, \quad z_m = z_\theta + r_\theta \cos \theta,$$

из рис. 2 находим плечо l_θ силы Q

$$l_\theta = GK = C_\theta R - C_\theta B = C_\theta E \cdot \cos \theta + EC_\theta \cdot \sin \theta - C_\theta B = l = y_\theta \cdot \cos \theta + (z_\theta - z_c) \cdot \sin \theta - a \cdot \sin \theta. \quad (6)$$

а затем и восстанавливающий момент

$$M_B = M_B(\theta) = Q \cdot l_\theta = Q \cdot [y_\theta \cdot \cos \theta + (z_\theta - z_c) \cdot \sin \theta - a \cdot \sin \theta] \quad (7)$$

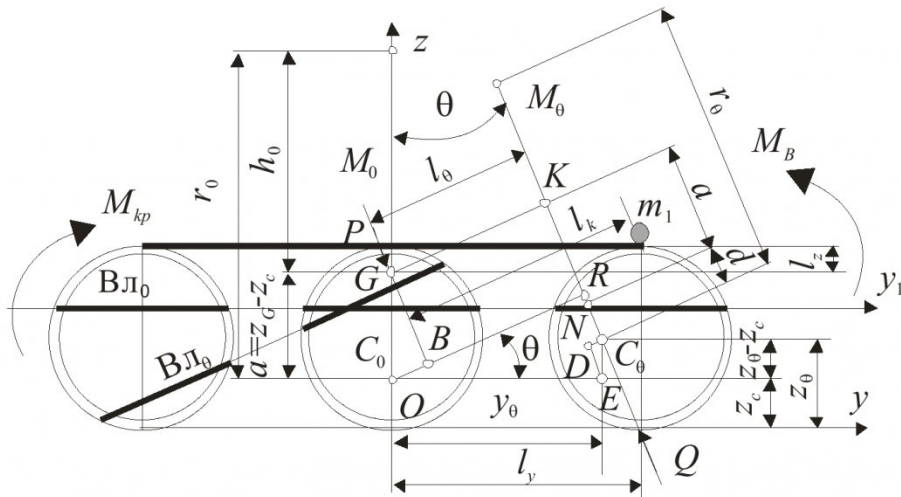


Рис. 2. Схема понтона с метacentрическими параметрами при его наклонении

В формулах (5) – (7) r_θ – определяется по формуле (4)

Графики зависимостей l_θ или M_B , называемые диаграммой статической устойчивости, играют важнейшую роль в анализе и оценке статической устойчивости любых плавучих средств.

Кроме статических сил на ПС действуют динамические силы (как правило, кратковременные). Если приложенная к ПС энергия компенсируется работой восстанавливающего момента, то ПС динамически устойчиво, в противном случае – не устойчиво.

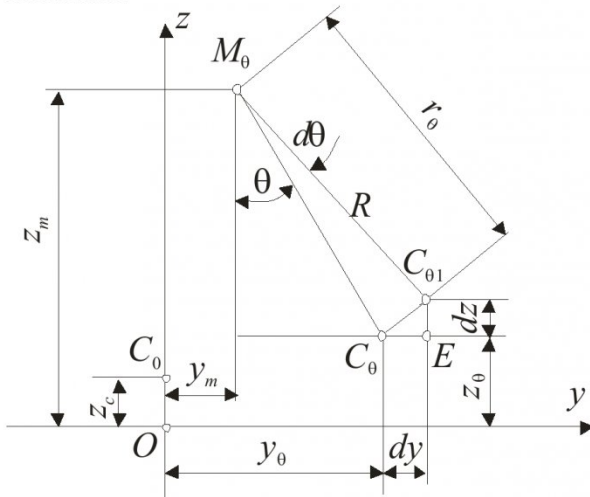


Рис. 3. Схема к определению координат метacentра

В силу сказанного найдем работу T восстанавливающего момента и работу U силы тяжести

$$T = \int_0^\theta M_B d\theta = Q \int_0^\theta l_\theta d\theta, \quad U = Q \cdot d,$$

и, приравняв их друг другу, находим расстояние d между ЦТ и ЦВ (рис. 2)

$$d = \int_0^\theta l_\theta d\theta, \quad (8)$$

полагая при этом, что ЦВ является точкой опоры плавучего средства [7].

Величина d называется плечом динамической устойчивости, которая связана с плечом статической устойчивости l_θ дифференциально-интегральным соотношением (8). Произведение водоизмещение Q на плечо динамической устойчивости d представляет собой восстанавливающий динамический момент

$$M_D = M_D(\theta) = Q \cdot d = Q \int_0^\theta l_\theta d\theta. \quad (9)$$

Ниже приведены результаты вычислительного эксперимента для одного типа ПВУ, составные элементы которого даны в таблице. Коэффициент плавучести k_p принят равным 0,579.

В соответствие с данными таблицы, вычислены необходимые параметры ПВУ: масса $m=4871,9$ кг; момент инерции относительно продольной оси $x_1 J_{x1} = 2993,4$ кгм²; масса обслуживающего персонала вместе с массой патрубка $m_i=500$ кг.

График изменения метacentрического радиуса в зависимости от угла крена (рис. 4) состоит из трех участков.

Точкам первого участка соответствуют положения ватерлинии в промежутке между её горизонтальным положением и положением, соответствующим касанию правого поплавка. Угол крена на этом участке меняется в промежутке $0^\circ - 18^\circ$.

Второму участку соответствует положение ватерлинии в интервале между её касаниями правого и среднего поплавков. Изменение угла крена лежит в промежутке $18^\circ - 48^\circ$. На третьем участке координаты точек соответствуют положениям ватерлинии, начиная с её касания среднего поплавка и, вплоть, до опрокидывания понтона. На

Таблица составляющих элементов ПВУ

№	Наименование составляющего элемента (размеры в м)	Кол-во	Масса, кг	
			1 шт.	общая
1	Труба-поплавок понтона $R = 0,4, L = 5,1, \delta_{mp} = 0,008$	3	782,69	2348,07
	Заглушка труба понтона $R_{зак} = 0,4$	6	31	186
2	Палубный настил $d = 1,8$	1	1	179
3	Бак-запасник воды в сборе на подставке $R_3 = 0,26, h_3 = 0,76, \delta_3 = 0,25$	1	158	158
4	Электродвигатель $R_4 = 0,3; \delta_4 = 0,17$	1	890	890
5	Насос $R_4 = 0,2$	1	485	485
6	Стойки ограждения $h_6 = 1,0$	10	7.6	76
7	Поручни, $l_7 = 5,0$	4	12,25	49

этом участке угол крена начинается с 49° .

Графики зависимостей плеча статической устойчивости (кривая 1) и плеча динамической устойчивости (кривая 2) от угла крена представляют собой диаграммы соответственно статической и динамической устойчивости понтона, которые показывают, что максимальному восстанавливающему моменту M_B соответствует угол крена 18° (рис. 5).

Точка на графике, при которой плечо статической устойчивости равно нулю, называется точкой «заката» диаграммы. Она соответствует потере устойчивости понтона при статической нагрузке, а её абсцисса равна углу крена $\theta_{зак} = 56^\circ$.

Очевидно, что кренящий момент обусловлен массой m_1 , состоящей из массы рабочих и массы патрубков, опускаемого в воду для её откачки (рис. 2). Причем наибольшая величина кренящего мо-

мента достигается при расположении массы на краю понтона. В этом случае плечо силы тяжести массы m_1 и величина кренящего момента определяются следующим образом (рис. 2)

$$l_k = l_y \cos \theta + l_z \sin \theta,$$

$$M_{kp} = M_{kp}(\theta) = m_1 g l_k =$$

$$= m_1 g (l_y \cos \theta + l_z \sin \theta). \quad (10)$$

На рис. 6 представлены графики статического восстанавливающего момента (кривая 1), динамического момента (кривая 2), кренящего момента (кривая 3), построенные с использованием формул (7), (9), (11).

Кренящий момент M_{kp} (кривая 3) пересекает кривую статической устойчивости в двух точках – А и В. В точке А угол θ_1 соответствует устойчивому состоянию понтона, поскольку в этом со-

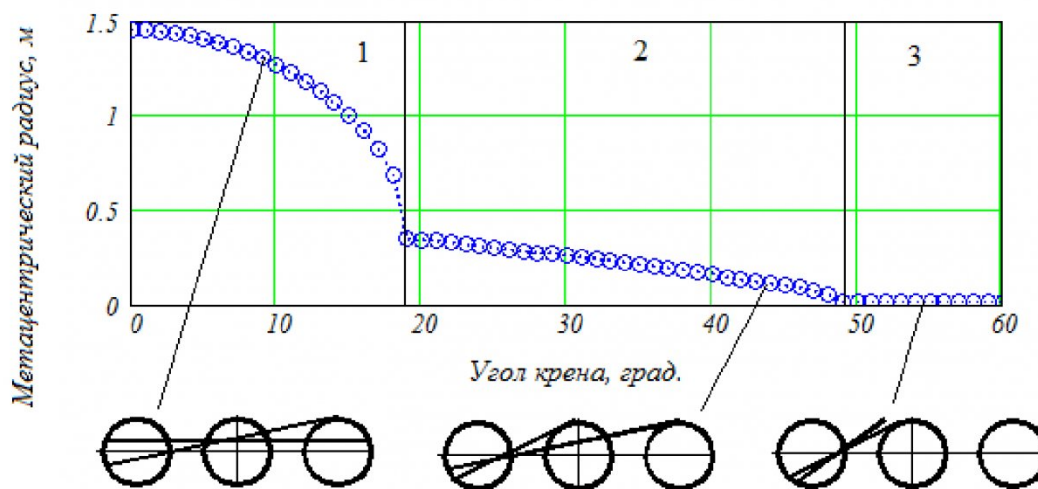


Рис. 4. График зависимости метацентрического радиуса от угла крена

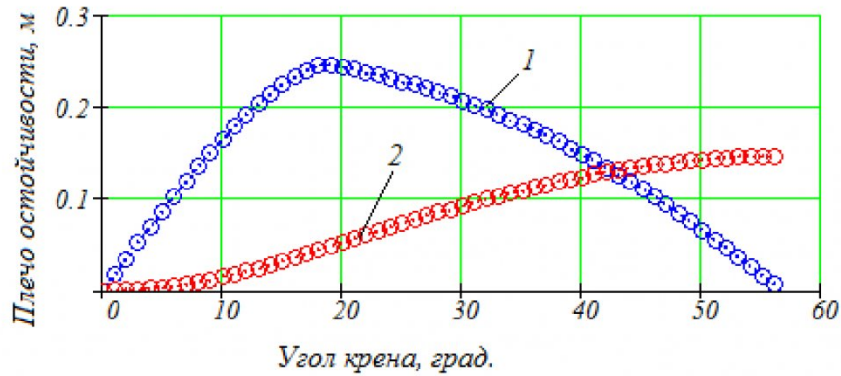


Рис. 5. Диаграммы статической и динамической устойчивости понтона

стоянии восстанавливающий момент превышает кренящий момент даже в том случае, если угол крена θ_1 получит небольшое приращение. Напротив, в точке B угол θ_2 соответствует положению неустойчивого состояния понтона, так как, придавая этому углу небольшое приращение, кренящий момент будет больше восстанавливающего, и понтон будет крениться до тех пор, пока не опрокинется. Если же θ_2 уменьшить на малую величину, то получится, что $M_{кр} < M_B$ и понтон перейдет в положение равновесия с углом крена θ_1 . Таким образом, угол θ_1 является единственным углом устойчивого состояния понтона. Следовательно, возрастающая ветвь кривой 1 до точки максимума соответствует устойчивым углам крена, а ниспадающая ветвь - неустойчивым.

Кренящий момент, равный максимальной ординате на графике статического момента устойчи-

вости, является предельным кренящим статическим моментом. Угол θ_{max} , соответствующий этому моменту является предельным статическим углом крена. На графике 1 (рис. 6) максимальный кренящий момент составляет 11810 Нм , а предельный статический угол крена равен 19° .

По графику статического момента устойчивости (рис. 6) легко определить значения предельных углов крена и соответствующих им предельных кренящих моментов. Так, например, кренящий момент в 4000 Нм (кривая 5) опрокидывает понтон при угле крена 50° , а кренящий момент 5000 Нм опрокидывает понтон при угле его крена в 47° .

При действии на понтон динамически приложенного кренящего момента, обусловленного резким, порывистым его приложением, условием его равновесия является равенство не моментов, а равенство работ кренящего и восстанавливающего

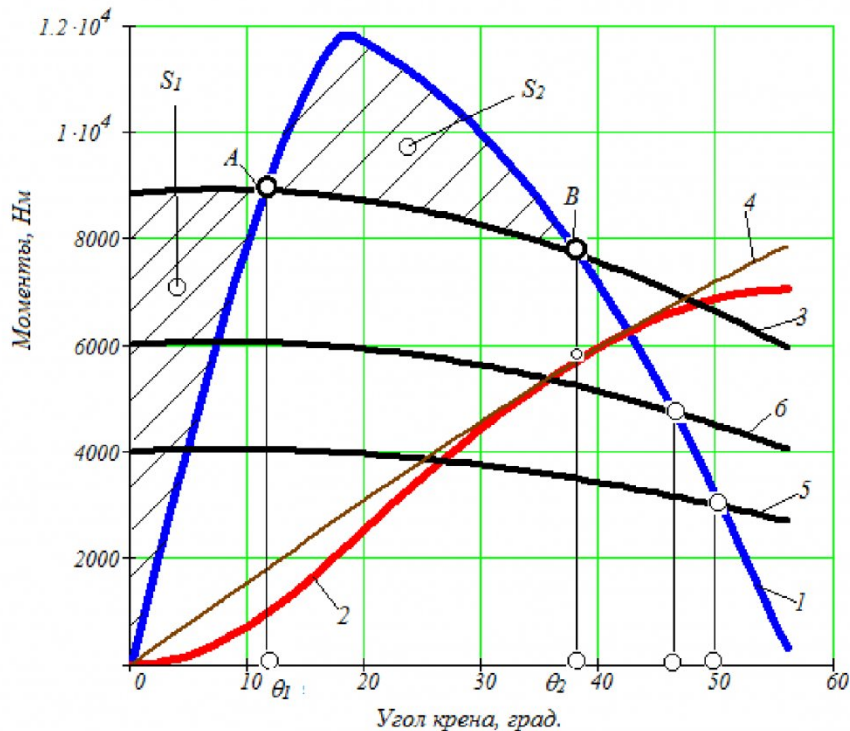


Рис. 6. К определению предельного угла крена

моментов.

$$\int_0^{\theta_d} M_B d\theta = \int_0^{\theta_d} M_{kp} d\theta, \quad (11)$$

где θ_d – угол крена, соответствующий углу динамического равновесия. Этот угол определяется из условия (11).

На рис. 6 представлена графическая иллюстрация этого условия. Максимальный, динамически приложенный кренящий момент, определяется из условия равенства площадей S_1 и S_2 . Он называется предельным динамическим моментом $M_{np.d}$.

Как следует из условия (10), при заданных параметрах водоотливной плавучей установки предельный динамический момент принимает единственное значение.

Следует отметить (рис. 6), что при θ_1 на графике динамического момента (кривая 2) находится точка перегиба, а прямая 4, проведенная из начала координат касается кривой 2 в точке, абсцисса которой равна углу θ_2 . Из рис.унка 6 следует,

что при данных параметрах ПВУ предельный динамический угол крена θ_{kp} составляет 38° , который соответствует значительной по величине нагрузке, равной массе в 1000 кг.

Выводы.

1. Представлено решение задачи о статической устойчивости на произвольных углах крена одного типоразмера понтона, применяемого на угольных разрезах.

2. Построены диаграммы статической и динамической устойчивости понтона, позволяющие оперативно определять предельные устойчивые и неустойчивые углы его крена.

3. Анализ диаграммы статической устойчивости показывает, что для рассматриваемой водоотливной установки существует одно значение предельного динамического угла крена, равного 38° , что соответствует массе подвижного груза в 1 т, прикладываемого внезапно на край левого (или правого) борта понтона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черданцев, С. В. Теоретические основы расчета понтонов, используемых на угольных разрезах // ФТПРПИ. – 2013, № 1.
2. Кучер, Н. А. Условия безопасного применения плавучих водоотливных установок / С. В. Черданцев, С. И. Протасов, С. Н. Подображин, В. В. Билибин // Безопасность труда в промышленности. – 2003, – № 1. – С. 12 – 14.
3. Черданцев, С. В. Уравнения движения понтонов в зумпфах угольных разрезов // Вест. КузГТУ. – 2013, – № 1. – С. 7 – 10.
4. Черданцев, С. В. Построение решения задачи о движении понтонов в зумпфах угольных разрезов // ФТПРПИ. – 2013, № 3.
5. Борисов, Р. В. Статика корабля / Р. В. Борисов, В. В. Луговский, Б. М. Мирохин, В. В. Рождественский. – СПб. : Судостроение, 2005. – 256 с.
6. Ремез, Ю. В. Качка корабля. – Л.: Судостроение, 1983.
7. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976.
8. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики, т.2. –М.: Наука, 1977.– 736 с.

□ Авторы статьи:

Черданцев
Николай Васильевич,
докт.техн.наук, зав. лаб. геомеханики угольных месторождений
Института угля СО РАН.
E-mail:
cherdantsevny@icc.kemsc.ru.

Черданцев
Сергей Васильевич,
докт. техн. наук, проф.
каф.математики КузГТУ.
E-mail: svch01@yandex.ru