DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.02.006
УДК 622.272:516.02

С.В. ЧЕРДАНЦЕВ
д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e–mail: svch01@yandex.ru

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ
д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e–mail: nvch2014@yandex.ru

ПЛАВУЧЕСТЬ И ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОНТОНОВ В ЗУМПФАХ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА (ОБЗОР ЖУРНАЛЬНЫХ СТАТЕЙ)

Для предотвращения затопления забоев угольных разрезов грунтовыми и подземными водами предусматривают специальные углубления в почве забоев для стока вод. По мере их заполнения воду откачивают с помощью водоотливного оборудования, установленного на плавучих средствах в виде понтонов. До настоящего времени еще нет научно обоснованных рекомендаций по использованию понтонов на угольных разрезах. Поэтому проблема безопасного использования понтонов остается пока не решенной. Однако в последнее время интерес к решению этой проблемы возрастает, о чем свидетельствуют регулярные публикации, посвященные различным аспектам использования понтонов: плавучести и остойчивости, качке на «тихой воде» и на регулярном волнении, устойчивости в процессе параметрической качки. В данной работе выполнен краткий обзор статей, посвященных проблемам эксплуатации понтонов на угольных разрезах Кузбасса. Более подробно рассматриваются вопросы плавучести и остойчивости понтонов. В частности, обсуждаются два подхода к анализу остойчивости понтонов, первый из которых базируется на методе Б.В. Давыдова, а второй основан на фундаментальной теореме Эйлера о малых отклонениях плавающих тел от положения равновесия. Выполнен сравнительный анализ данных подходов. Приведен анализ боковой остойчивости понтонов на больших кренах.

Ключевые слова: ПОНТОНЫ, ВАТЕРЛИНИЯ, ЗАКОН АРХИМЕДА, ЦЕНТР ВЕЛИЧИНЫ, КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА ПЛАВУЧЕСТИ, УГЛЫ КРЕНА И ДИФФЕРЕНТА, МЕТАЦЕНТРИЧЕСКИЙ РАДИУС, МЕТАЦЕНТРИЧЕСКАЯ ВЫСОТА, ОСТОЙЧИВОСТЬ ПОНТОНА.

Введение

Технология разработки угольных месторождений открытым способом предусматривает наличие зумпфа, представляющего собой углубление в почве забоя для стока грунтовых и подземных вод. По мере заполнения зумпфа 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).

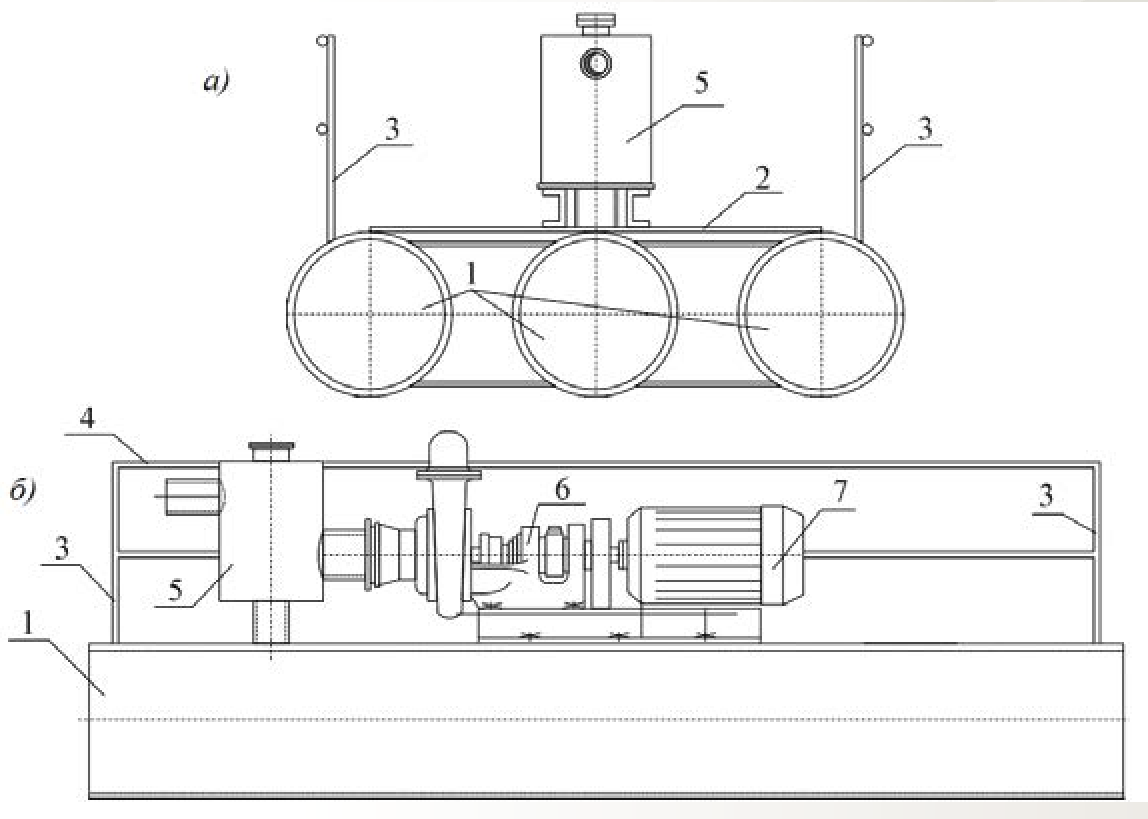
К настоящему моменту понтоны проектируются на каждом угольном разрезе индивидуально. Конструкции понтонов можно условно разделить на два типа.

К первому типу принадлежат понтоны (рис. 1), в которых металлические трубы-поплавки, герметически заваренные с торцов, расположены параллельно друг другу. При этом в зависимости от производительности водоотливного оборудования используют нечетное количество поплавков (чаще три, пять), на которые с помощью сварки настилают палубу из металлических пластин, обшитых досками, и боковые ограждения. Затем с помощью крепежных средств на палубу устанавливают насосное оборудование с электроприводом.

В конструкциях понтонов 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 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. Однако в расчетах нет анализа поведения понтонов под действием внешних сил. Вместе с тем в процессе эксплуатации понтонов неизбежно возникают внешние возмущения, которые могут привести либо к немедленному опрокидыванию понтонов, не обладающих достаточной остойчивостью, либо к их качке с нарастающей амплитудой и последующему опрокидыванию.



1 — металлические трубы-поплавки; 2 — палубный настил; 3 — стойки ограждения; 4 — поручни; 5 — бак-запасник воды; 6 — насос; 7 — электродвигатель

Рис. 1. Понтон с водоотливным оборудованием: а) вид с торца; б) вид сбоку

Детальные исследования плавучести и остойчивости понтона были выполнены в Кузбасском государственном техническом университете им. Т.Ф. Горбачева и Институте угля СО РАН. В частности, в работах [1–4] исследована плавучесть и статическая остойчивость понтонов как на малых, так и на произвольных кренах и дифферентах.

Исследования движения понтонов в зумпфах на «тихой воде» [5–8] выявили три вида их качки: вертикальную, боковую и килевую, анализ которых подробно обсуждался в работах [9–12], где определены также динамические свойства понтонов на регулярном волнении [13, 14]. В этих статьях выявлен интервал длины волны, при котором боковая качка понтона является наиболее опасной и может привести к его опрокидыванию.

Совместная вертикально-боковая качка и устойчивость понтона «на тихой воде» обсуждалась в работе [14], в которой не обнаружено опасных режимов его качки. Однако если вертикально-боковая качка понтона в зумпфе происходит на регулярных волнах, то опасные режимы качки, как установлено в работе [15], существуют, в силу чего понтон может потерять устойчивость и опрокинуться.

Таким образом, расчет понтона в зумпфах угольных разрезов состоит из следующих этапов: расчет плавучести, расчет статической остойчивости, определение параметров качки понтона на регулярном волнении, выявление областей динамической неустойчивости в процессе параметрической качки понтона. Ниже более подробно рассматриваются только плавучесть и статическая остойчивость понтонов.

1. Плавучесть понтонов в зумпфах угольных разрезов обсуждалась в работе [2], часть материала которой мы приводим здесь.

Если понтон не совершает никаких движений, то со стороны воды на каждый элемент смоченной поверхности понтона действует по нормали гидростатическое давление p, равнодействующая которого Q, называемая силой плавучести, приложена в центре тяжести C погруженного объема, называемого центром величины (ЦВ) [16, 17], и направлена вертикально вверх (рис. 2).

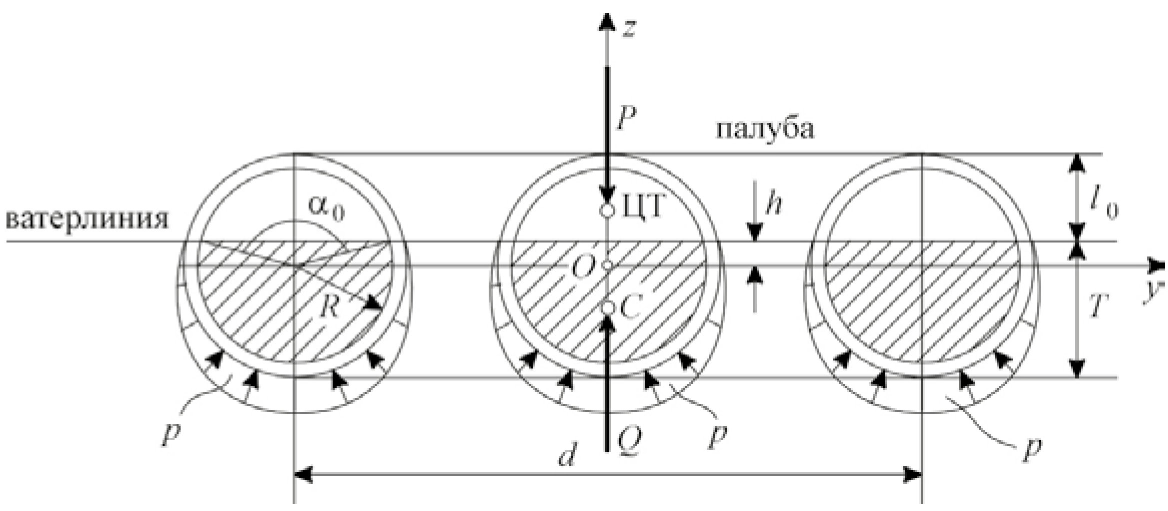


Рис. 2. К анализу плавучести понтона

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, V_1 — объемное водоизмещение.

Для равновесия понтона необходимо, чтобы главный вектор и главный момент всех сил были равны нулю [16–18]. Из первого условия мы получаем уравнение плавучести

$$P = \rho g V_1, \tag{1.1}$$

а на основе второго условия заключаем, что

ЦВ должен находиться на одной вертикали с центром тяжести (ЦТ).

Любое плавучее средство должно иметь запас плавучести [16, 17], что обеспечивается объемом непроницаемой для воды его надводной части $V_н$, расположенной выше ватерлинии (рис. 2). Выраженный в долях объемного водоизмещения, коэффициент запаса плавучести k_p должен составлять не менее 0,3.

Зная силу тяжести (вес) P плавучей водоотливной установки, из уравнения (1.1) мы можем определить объемное водоизмещение V_1:

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

а задавая запас плавучести k_p, найдем объем V_0 поплавков понтона:

$$V_0 = V_1 + V_н = V_1 + k_p V_1 = (1 + k_p)V_1 = = (1 + k_p)\frac{P}{\rho g}. \quad (1.2)$$

Объемное водоизмещение понтона мы можем вычислить по формуле

$$V_1 = j \cdot A_1^{(1)} L, \quad (1.3)$$

где L — длина поплавков понтона, а 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 $A_н^{(1)}$:

$$A_1^{(1)} = A_0^{(1)} - A_н^{(1)}, \quad (1.4)$$

откуда, учитывая, что, $A_1^{(1)} = A_н^{(1)} / k_p$ получаем уравнение

$$A_0^{(1)} - \frac{k_p + 1}{k_p} A_н^{(1)} = 0, \quad (1.5)$$

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

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

преобразуемой после интегрирования к виду

$$A_н^{(1)} = R^2 \left[\arccos(1-\zeta) - (1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)} \right], \quad (1.6)$$

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

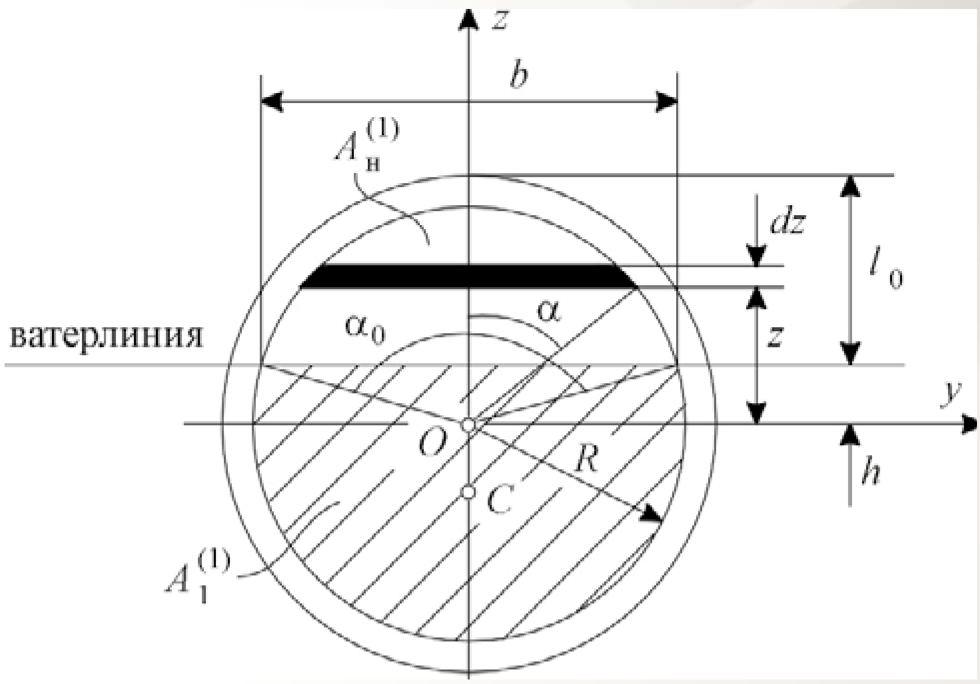


Рис. 3. К анализу плавучести понтона

В силу формулы (1.6) уравнение (1.5) приводится к трансцендентному виду

$$\arccos(1-\zeta)-(1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}=\frac{\pi k_p}{k_p+1}, \quad (1.7)$$

решение которого зависит от величины k_p. Так, при k_p = 0,3 величина ζ = 0,5627; при k_p = 0,5 — ζ = 0,7351 и т. д.

Зная ζ, находим размер b (рис. 3) по формуле

$$b=2\sqrt{R^2-h^2}=2R\sqrt{\zeta(2-\zeta)}. \quad (1.8)$$

Положение ЦВ (на рис. 3 точка C) может быть найдено как положение центра тяжести подводной части $A_1^{(1)}$, которое мы находим по формуле [18, 19]

$$z_C=\frac{S_0^{(y)}-S_н^{(y)}}{A_0^{(1)}-A_н^{(1)}}, \quad (1.9)$$

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

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

которая после интегрирования представляется в виде

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

то формула (1.9) будет выглядеть следующим образом:

$$z_C=-\frac{2}{3}R\frac{\left[\zeta(2-\zeta)\right]^{3/2}}{\pi-\left[\arccos(1-\zeta)-(1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}\right]}, \quad (1.10)$$

и при ζ = 0,5627 величина $z_C=-0{,}201R$.

Таким образом, расчет плавучести понтона необходим, чтобы определить относительную максимальную высоту ζ надводной части поплавков и положение центра величины z_C понтона в положении равновесия.

2. **Статическая остойчивость понтона** при малых кренах и дифферентах исследовалась в работах [1, 2], а на больших кренах — в [3, 4]. Статическая остойчивость представляет собой способность понтона возвращаться в положение равновесия после прекращения внешних воздействий, которыми понтон был выведен из этого положения.

В отличие от понятия устойчивости, используемого в теоретической механике [18] и сопротивлении материалов [19], остойчивость имеет меру, т. е. может быть большой или малой [16, 17], а устойчивость характеризует только качественное состояние [18, 19]. 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 неостойчивым.

При перемещении вдоль оси Oz понтон с необходимым запасом плавучести всегда остойчив, и лишь в аварийных случаях при приеме чрезмерного количества груза понтон может потерять вертикальную остойчивость и затонуть.

Более важной является проблема обеспечения боковой остойчивости понтона, к анализу которой возможны два подхода. Первый из них рассмотрен в работе [1], где указана расчетная схема понтона, представляющая собой трехсвязную плавающую область, поперечное сечение которой имеет вид многоугольника с площадью S (рис. 4).

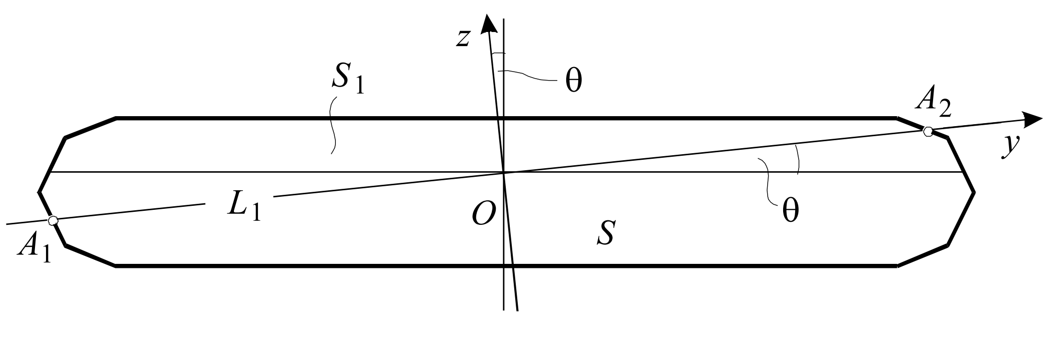


Рис. 4. Схема расчетной модели понтона в методе Б.В. Давыдова

Для равновесия плавающего в жидкости тела необходимо выполнение следующих условий [16–18]: 1) равновесие возможно тогда, когда погружена определенная (постоянная) часть объема тела; 2) прямая, соединяющая центр тяжести тела с центром тяжести погруженного объема, должна располагаться по нормали к свободной поверхности жидкости.

Следовательно, задача о нахождении положений равновесия плавающей площади S сводится к следующему: провести прямую L_1 так, чтобы она отсекла от материальной площади S заданную часть S_1, и чтобы при этом прямая, соединяющая центр тяжести всего тела с центром тяжести отсеченной площади, была расположена по нормали к секущей прямой L_1. Если поместить тело в жидкость так, чтобы секущая прямая, удовлетворяющая отмеченным двум условиям, совпадала со свободной поверхностью жидкости, то тело будет уравновешено.

Условимся всякую прямую, отсекающую данную площадь от плавающей материальной площади, называть прямой сечения. Прямая сечения при непрерывном перемещении огибает некоторую кривую, называемую линией сечения. Центры тяжести отсекаемых площадей образуют линию центров величины.

Для анализа остойчивости плавающего тела в работе [1] авторы использовали метод Б.В. Давыдова [18], сущность которого состоит в отыскании уравнения линии центров величины в дифференциальной форме с последующим его интегрированием.

Метод Б.В. Давыдова в работе [1] реализован в представленной ниже последовательности. Вначале с плавающей площадью авторы жестко связали прямоугольную систему координат zOy (см. рис. 4), в которой уравнение контура плавающей площади представляется в виде

$$z = f(y). \tag{2.1}$$

Пусть прямая сечения L_1, определяемая уравнением

$$z = ay + b, \tag{2.2}$$

пересекает данный контур в точках $A_1(y_1,z_1)$ и $A_2(y_2,z_2)$, координаты которых представляют собой функции параметров a и b:

$$y_1 = y_1(a,b),\ z_1 = z_1(a,b),$$

$$y_2 = y_2(a,b),\ z_2 = z_2(a,b).$$

Далее было учтено, что изменение параметров a и b прямой L_1 описывается первым уравнением Б.В. Давыдова [18]

$$\frac{y_1(a,b) + y_2(a,b)}{2} da + db = 0. \tag{2.3}$$

Путем интегрирования этого уравнения найдена связь между параметрами a и b, которую можно представить в виде

$$(a,b) = C. \tag{2.4}$$

Наряду с уравнением (2.3) авторы [1] использовали второе и третье уравнения Б.В. Давыдова [18]

$$\frac{d\xi}{da} = \frac{(y_2 - y_1)^3}{12S_1} da, \tag{2.5}$$

$$\frac{d\eta}{d\xi} = a, \tag{2.6}$$

где ξ, η — текущие координаты линии центров.

Из уравнений (2.3), (2.4), (2.5) получена связь

$$\xi = \xi_1(a) + C_1, \tag{2.7}$$

а из уравнений (2.6) и (2.7) найдена η как функция переменной a:

$$\eta = \eta_1(a) + C_2. \tag{2.8}$$

Уравнение линии центров получается посредством исключения из выражений (2.7), (2.8) параметра a.

Для оценки остойчивости понтона авторы [1] воспользовались фундаментальной теоремой теории корабля [16, 17], согласно которой если в положении равновесия метацентр плавающего тела находится выше его центра тяжести, то положение равновесия тела будет остойчивым, если ниже, то неостойчивым.

Так как метацентр представляет собой центр кривизны линии центров, то расстояние его до центра тяжести вытесненного объема будет равняться радиусу кривизны ρ линии центров. Следовательно, если линия центров описывается уравнением $\eta = \eta(\xi)$, то

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\dfrac{d\eta}{d\xi}\right)^2\right]^{3/2}}{\dfrac{d^2\eta}{d\xi^2}}.$$

Обозначим через $\delta(a)$ расстояние между центром тяжести всего тела и центром тяжести вытесненного объема жидкости. Тогда положение равновесия будет устойчивым или неустойчивым в зависимости от того, выполняется ли неравенство

$$\rho(a) \geq \delta(a).$$

Рассмотренный подход к анализу остойчивости понтонов в зумпфах угольных разрезов, основанный на методе Б.В. Давыдова, позволил выявить причины несчастного случая, произошедшего в марте 2001 года на разрезе «Междуреченский» ОАО «Междуречье» в результате опрокидывания плавучей водоотливной установки.

Анализируя метод Б.В. Давыдова, мы отметим, что замена поперечного сечения понтона, представляющего собой трехсвязную область, односвязной площадью S является, вообще говоря, довольно грубой аппроксимацией, анализ которой не выполнен до сих пор.

Кроме этого, в методе Б.В. Давыдова необходимо вычислить площадь S_1 (см. формулу (2.5)), расположенную над водой, что является достаточно сложной вычислительной процедурой. В силу сказанного, нам представляется подход к анализу остойчивости понтонов, используемый в статье [1], непродуктивным. Поэтому в следующей работе [2] плавучесть и остойчивость понтонов в зумпфах угольных разрезов обсуждалась на основе теоремы Эйлера [16, 17], при использовании которой нет необходимости аппроксимировать поперечное сечение понтона односвязной областью.

В самом деле, на основании теоремы Эйлера при небольших наклонениях плавучего средства водоизмещение не меняется и, следовательно, величина погруженного объема остается неизменной. Поэтому входящий $\delta V_П$ и выходящий $\delta V_Л$ объемы равны. Следовательно, мы можем утверждать, что линия пересечения двух равнообъемных ватерлиний при малом отклонении проходит через центры тяжести обеих ватерлиний, совпадающих с точкой O_1, относительно которой и будет происходить поворот ватерлиний (рис. 5).

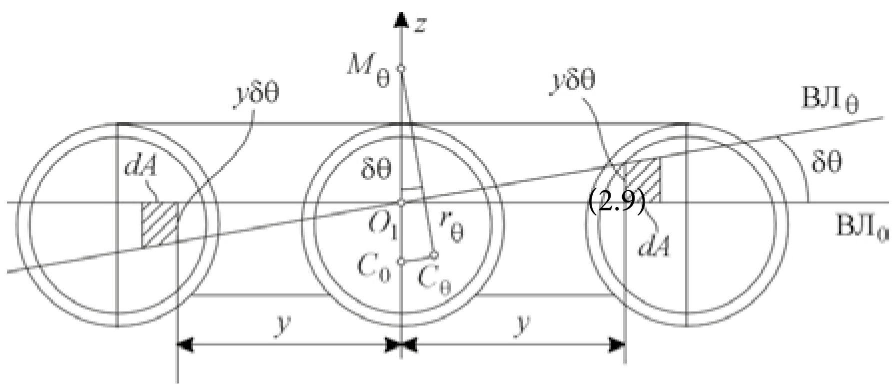


Рис. 5. Поперечный метацентр M_θ и поперечный метацентрический радиус r_θ

При крене на малый угол $\delta\theta$ ватерлиния из положения $ВЛ_0$ перейдет в положение $ВЛ_\theta$, а центр величины переместится из точки C_0 в точку C_θ по дуге C_0C_θ. Следовательно, 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 равно:

$$d(\delta S_z) = d(\delta V)\cdot y = \delta\theta \cdot y^2 dA,\ d(\delta S_y) =$$

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

и, следовательно, суммарное изменение статических моментов определяется посредством следующих формул:

$$\delta S_z = \delta\theta \int_A y^2 dA,\ \delta S_y = \frac{(\delta\theta)^2}{2} \int_A y^2 dA, \quad (2.9)$$

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

$$\delta S_z = V_1 \cdot \delta y_C,\ \delta S_y = V_1 \cdot \delta z_C. \quad (2.10)$$

Из сопоставления формул (2.9) и (2.10) вытекают формулы

$$\delta y_C = \frac{\delta\theta}{V_1}\int_A y^2 dA,\ \delta z_C = \frac{(\delta\theta)^2}{2V_1}\int_A y^2 dA. \quad (2.11)$$

Поскольку в формулах (2.11)

$$\int_A y^2 dA = I_{x_1}$$

является моментом инерции площади ватерлинии относительно продольной оси O_1x_1, параллельной оси O_x, то формулы (2.11) можно переписать следующим образом:

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

в силу чего длина дуги кривой C_0C_θ будет определяться посредством формулы

$$\delta l_C = \sqrt{(\delta y_C)^2 + (\delta z_C)^2} = \frac{I_{x_1}}{V_1}\delta\theta\sqrt{1+\frac{(\delta\theta)^4}{4}} \approx \frac{I_{x_1}}{V_1}\delta\theta, \quad (2.12)$$

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

Кривизна дуги C_0C_θ, центр которой находится в точке M_θ (рис. 5), называемой поперечным метацентром, характеризуется поперечным метацентрическим радиусом r_θ, определяемым по формуле

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

которую, в силу формулы (2.12), можно переписать как

$$r_\theta = \frac{I_{x_1}}{V_1}. \quad (2.13)$$

Рассматривая дифферент понтона на малый угол $\delta\psi$, аналогично найдем продольный метацентрический радиус

$$r_\psi = \frac{I_{y_1}}{V_1}, \quad (2.14)$$

определив тем самым 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 $F = b \cdot L$, 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 ВЛ$_0$) мы можем определить по известным формулам сопротивления материалов [19]:

$$I_{x_1} = j\frac{b^3L}{12} + 2\sum_{i=1}^{q}\left[bL\left(\frac{d}{2}-(i-1)d_1\right)^2\right],\ I_{y_1} = j\frac{bL^3}{12}, \quad (2.15)$$

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

В силу формул (1.3), (1.4), (1.6) и (2.15), формулы (2.13) и (2.14) преобразуются к виду

$$r_\theta = R\frac{2\left[\sqrt{\zeta(2-\zeta)}\right]^3\left\{1+\frac{3\delta^2}{2j\zeta(2-\zeta)}\sum_{i=1}^{(j-1)/2}\left[\left(1-(i-1)\frac{2}{j-1}\right)^2\right]\right\}}{3\left\{\pi-\left[\arccos(1-\zeta)-(1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}\right]\right\}}, \quad (2.16)$$

$$r_\psi = R\frac{\sqrt{\zeta(2-\zeta)}}{6\left\{\pi-\left[\arccos(1-\zeta)-(1-\zeta)\sqrt{\zeta(2-\zeta)}\right]\right\}}\left(\frac{L}{R}\right)^2, \quad (2.17)$$

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

В конструкциях понтонов первого типа с тремя поплавками, как правило, δ = 3,5, L/R = 14,5. Полагая, что ζ = 0,5627, по формулам (2.16) и (2.17) найдены $r_\theta = 1,784R$, $r_\psi = 13,04R$.

При равнообъемном наклонении кренящим моментом $M_{\text{кр}}^{(x)}$ центр тяжести понтона не меняет своего положения, а центр влияния перемещается в сторону наклонения. Вес P и архимедова сила Q образуют пару (рис. 6), плечо которой f является плечом статической остойчивости.

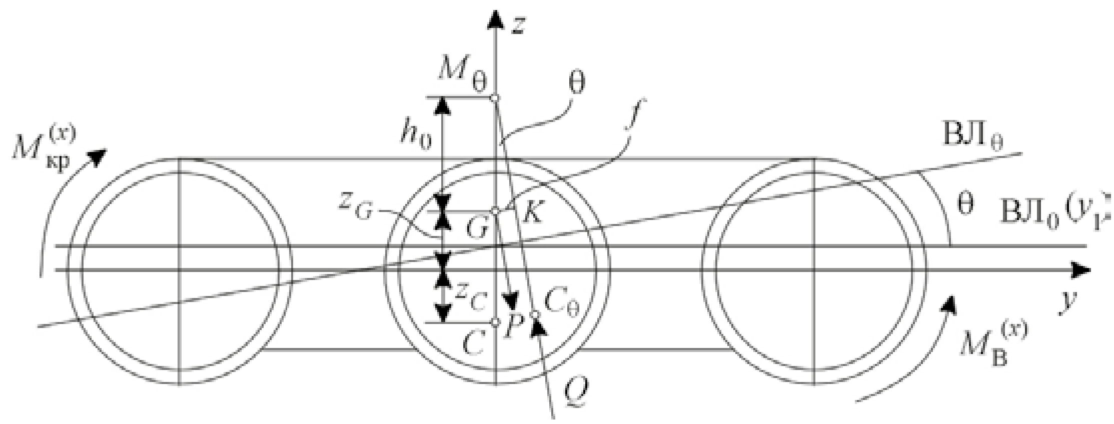


Рис. 6. Кренящий $M_{кр}^{(x)}$ и восстанавливающий $M_В^{(x)}$ моменты относительно оси O_1x_1

Его величину легко определить из прямоугольного треугольника $M_\theta GK$ по формуле

$$f = h_0\theta, \tag{2.18}$$

в которой учтено, что при малых углах крена $\sin\theta \cong \theta$, а h_0 является поперечной метацентрической высотой. Тогда восстанавливающий момент равен

$$M_В^{(x)} = P\cdot f = P\cdot h_0\cdot\theta, \tag{2.19}$$

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

Аналогично при дифференте понтона возникает восстанавливающий момент

$$M_В^{(y)} = P\cdot H_0\cdot\psi, \tag{2.20}$$

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

Формулы (2.19) и (2.20) 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 можно найти по формуле (рис. 6)

$$h_0 = r_\theta - |z_C| - z_G, \tag{2.21}$$

то можно оценить и остойчивость трехпоплавкового понтона (ζ= 0,5627), центр тяжести которого z_G = 0,474R, а остальные параметры вычислены нами 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

$$H_0 = r_\psi - |z_C| - z_G = 12,365R, \tag{2.22}$$

и, следовательно, понтон также остойчив.

Таким образом, при малых углах дифферента начальная остойчивость рассмотренного понтона в H_0/h_0 = 11,15 раза выше его начальной остойчивости при малых углах крена.

Анализируя описанный метод исследования остойчивости понтонов, отметим его безусловное преимущество по сравнению с методом Б.В. Давыдова. Во-первых, в данном методе нет необходимости аппроксимировать многосвязную область понтона односвязной. Во-вторых, для определения метацентрических высот нет необходимости в процедуре интегрирования, поскольку используются достаточно простые формулы (2.21) и (2.22). В-третьих, в описанном методе боковая и продольная остойчивости определяются по схожим формулам, в то время как методом Б.В. Давыдова исследована только боковая остойчивость. В-четвертых, метод Б.В. Давыдова оказывается неприемлемым для исследования остойчивости на больших кренах и дифферентах, а описанный метод, как показано в работах [3, 4], пригоден и в этом случае.

На больших кренах метацентрический радиус определяется по формуле [3, 4]

$$r_\theta = \frac{I_{x\theta}}{V_1}, \tag{2.23}$$

аналогичной формуле (2.13), с той существенной разницей, что в формуле (2.23) момент инерции $I_{x\theta}$ зависит от угла крена θ, что, в свою очередь, приводит к изменению положения ЦВ и метацентра M_θ.

Для определения положения ЦВ находим сначала бесконечно малые перемещения ЦВ (рис. 7):

$$dy = C_\theta C_{\theta 1} \cdot \cos\theta = r_\theta \cdot d\theta \cdot \cos\theta,$$

$$dz = C_\theta C_{\theta 1} \cdot \sin\theta = r_\theta \cdot d\theta \cdot \sin\theta,$$

интегрируя которые получаем координаты ЦВ и координаты метацентра:

$$y_\theta = \int_0^\theta r_\theta \cos\theta d\theta, \; z_\theta - z_c = \int_0^\theta r_\theta \sin\theta d\theta, \tag{2.24}$$

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

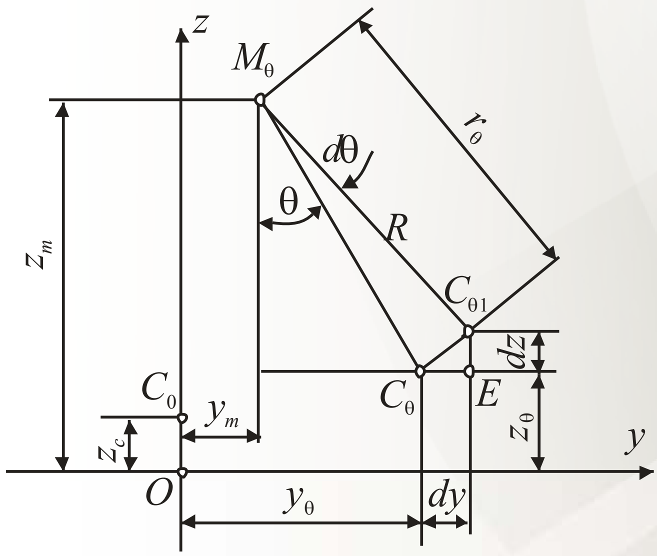


Рис. 7. Схема к определению координат метацентра

На рис. 8 показан график изменения метацентрического радиуса в зависимости от угла крена для понтона, представленного на рис. 1.

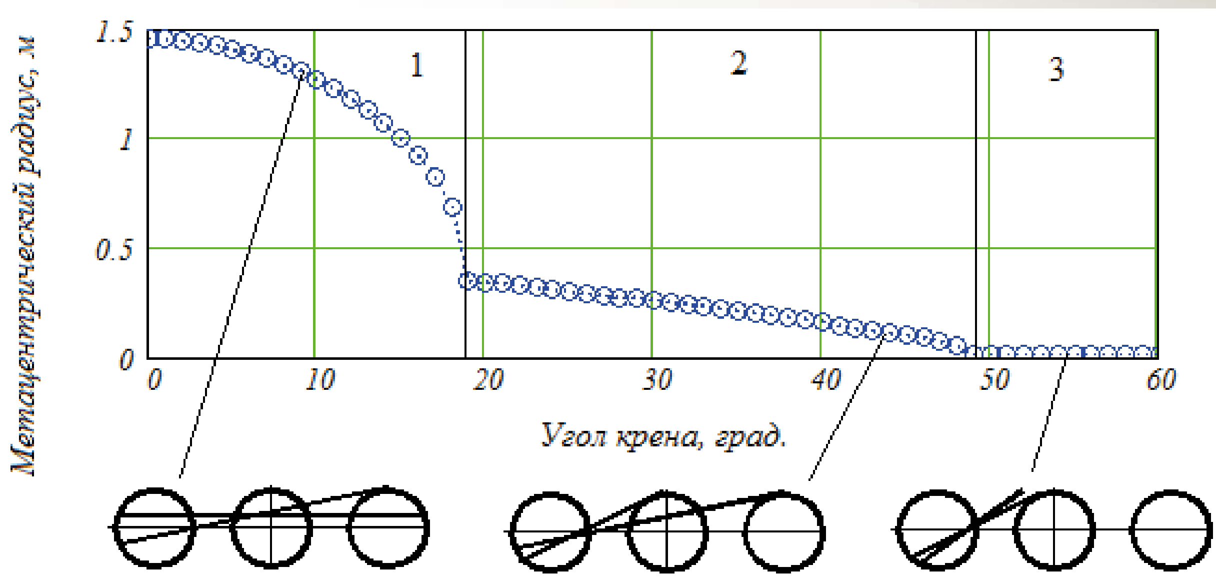


Рис. 8. График зависимости метацентрического радиуса от угла крена

Коэффициент плавучести понтона k_p = 0,579, а значения его основных параметров представлены в таблице.

Таблица

Составляющие элементы ПВУ

№	Наименование составляющего элемента, размеры в м	Кол-во	Масса, кг	
			1 шт.	общая
1	Труба-поплавок понтона, R = 0,4; L = 5,1	3	782,69	2348,07
	Заглушка трубы понтона	6	31	186
2	Палубный настил, d = 1,8	1	1	179
3	Бак-запасник воды в сборе на подставке	1	158	158
4	Электродвигатель	1	890	890
5	Насос, R = 0,2	1	485	485
6	Стойки ограждения, h = 1,0	10	7.6	76
7	Поручни, l = 5,0	4	12,25	49

График 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 $0 \div 18^0$. Второму участку соответствует положение ватерлинии в интервале между её касаниями правого и среднего поплавков. Изменение угла крена лежит в промежутке $18^0 \div 48^0$.

На третьем участке координаты точек соответствуют положениям ватерлинии, начиная с её касания среднего поплавка и вплоть до опрокидывания понтона. На этом участке угол крена начинается с величины 49^0.

Таким образом, если на малых кренах метацентрический радиус не зависит от угла крена, то на больших кренах выявлены три участка, на каждом из которых метацентрический радиус зависит от угла крена, причем эти зависимости принципиально различны.

Выводы

1. Указано, что для исследования остойчивости понтонов в зумпфах угольных разрезов существуют два подхода, первый из которых основан на методе Б.В. Давыдова, а второй базируется на фундаментальной теореме Эйлера о малых отклонениях плавающего тела от положения равновесия. В результате их сравнительного анализа отмечены следующие преимущества второго подхода по сравнению с первым:

а) нет необходимости многосвязную область, которую представляет собой понтон, аппроксимировать односвязной областью;

б) для определения метацентрических высот используются несложные алгебраические формулы, поэтому не надо прибегать к процедуре интегрирования, как это делается в методе Б.В. Давыдова;

в) второй подход, в отличие от первого, может быть применен к анализу остойчивости понтонов на больших кренах.

2. В результате анализа остойчивости понтона на больших кренах установлено, что метацентрический радиус представляет собой функцию угла крена, при этом её график состоит из участков, существенно отличающихся друг от друга. В то же время на малых кренах метацентрический радиус вообще не зависит от угла крена.

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. — С. 12–14.
2. Черданцев С.В. Теоретические основы расчета понтонов, используемых на угольных разрезах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 1. — С. 61–69.
3. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Проблема остойчивости понтонов, применяемых на угольных разрезах // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 7. — С. 45–49.
4. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Остойчивость понтонов в зумпфах угольных разрезов на больших углах крена // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 4. — С. 32–37.
5. Черданцев С.В. Уравнения движения понтонов в зумпфах угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 1. — С. 7–10.
6. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Формы движения понтона в зумпфе угольного разреза // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2013. — Т. 1.2. — С. 45–54.
7. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Построение решения задачи о движении понтонов в зумпфах угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2014. — № 5. — С. 3–8.
8. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Боковая качка понтонов в зумпфах угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 6. — С. 30–36.
9. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ боковой качки понтонов, применяемых на угольных разрезах // Безопасность труда в промышленности. — 2013. — № 11. — С. 42–45.
10. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Математическое моделирование качки понтона в зумпфе угольного разреза // Вычислительные технологии. — 2014. — Т. 19. — № 1. — С. 74–86.
11. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Остойчивость и вынужденная качка понтона в зумпфе угольного разреза // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2013. — № 2. — С. 91–97.
12. Черданцев С.В. Постановка задачи о гравитационных волнах жидкости в зумпфах угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 6. — С. 10–12.
13. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Качка понтона на регулярном волнении в зумпфе угольного разреза // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2014. — Т. XVII. — № 4. — С. 136–146.
14. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Анализ математической модели устойчивости понтона в процессе его вертикально-боковой качки в зумпфе угольного разреза // Вычислительные технологии. — 2015. — Т. 20. — № 2. — С. 79–90.
15. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. Анализ качки понтона с периодически изменяющимися параметрами остойчивости на взволнованной поверхности мелкой воды // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2016. – Т. 19. — № 4. — С. 441–456.
16. Борисов Р.В., Луговский В.В., Мирохин Б.М., Рождественский В.В. Статика корабля. — СПб.: Судостроение, 2005. — 256 с.
17. Семенов-Тян-Шанский В.В. Статика и динамика корабля. — Л.: Судостроение, 1973. — 607 с.
18. Жуковский Н.Е. Теоретическая механика. — М.: Гостехиздат, 1952. — 811 с.
19. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.02.006
UDC 622.272:516.02

S.V. Cherdantsev
Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e–mail: svch01@yandex.ru

N.V. Cherdantsev
Doctor of Engineering Sciences, Principal Researcher
The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, Kemerovo
e–mail: nvch2014@yandex.ru

BUOYANCY AND STABILITY OF PONTOONS IN SUMPS OF OPEN-PIT COAL MINES IN KUZBASS (ARTICLES REVIEW)

Drain sumps for underground and surface water are provided for prevention of open pit coal mines flooding. When filled, water is pumped out by pumping equipment, fixed on floating crafts in the form of pontoons. Today there are no scientifically based recommendations for the use pontoons in open pit coal mines, that's why the problem of pontoons safety use is still not solved. However, recently there has been an interest in solving this problem, devoted to regular publications on various areas of pontoons use: buoyancy and stability, rolling on «still water» and on regular waves, stability in the process of parametric pitching. In the article the brief review of articles considering the problems connected with the use of pontoons in open-pit coal mines in Kuzbass is given. The buoyancy and stability of pontoons are considered in more detail. Two mainly types of the analyses of stability of pontoons are described. First is based on B.V. Davydov method, second is based on the Euler fundamental theorem about small deviations of floating bodies from the equilibrium position. A comparative analysis of these approaches is done. The analysis of the rolling motion of the pontoons on large banks is presented.

Keywords: PONTOON, WATERLINE, ARCHIMEDES PRINCIPAL, CENTER OF VOLUME, COEFFICIENT OF RESERVE BUOYANCY, TRIM AND LIST ANGLES, METACENTRIC RADIUS, METACENTRIC HEIGHT, PONTOONS STABILITY.

REFERENCES

1. Kucher N.A., Cherdantsev S.V., Protasov S.I., Podobrazhin S.N., Bilibin V.V. Usloviya bezopasnogo primeneniya plavuchikh vodootlivnykh ustanovok (The conditions for floating water-drainage installation safe use). Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational safety in Industry. 2003. № 1. pp. 12–14.

2. Cherdantsev S.V. Teoreticheskie osnovy rascheta pontonov, ispolzuemykh na ugolnykh razrezakh (Theoretical basis for calculation of pontoons used in open pit mines). Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. pp. 52–59.

3. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Problema ostoychivosti pontonov, primenyaemykh na ugolnykh razrezakh (Problem of stability of pontoons used at open-pit coal mines). Bezopasnost truda v promyshlennosti = Ocupational Safety in Industry. 2013. № 7. pp. 45–49.

4. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Ostoychivost pontonov v zumpfakh ugolnykh razrezov na bolshikh uglakh krena (Stability of pontoon at coal pit under greater corners tumbling). Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2013. № 4. pp. 32–37.

5. Cherdantsev S.V. Uravneniya dvizheniya pontonov v zumpfakh ugolnykh razrezov (Equations

of motion of pontoons in the pump sump of coal opencasts). Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2013. № 1. pp. 7–10.

6. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Formy dvizheniya pontona v zumpfe ugolnogo razreza (Forms of pontoon movement in the sump of the open pit coal mine). Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety. 2013. Vol. 1.2. pp. 45–54.

7. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Postroenie resheniya zadachi o dvizhenii pontonov v zumpfakh ugolnykh razrezov (The creation of the problem solution of pontoon movement in the sump of the open pit coal mine). Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2014. № 5. pp. 3–8.

8. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Bokovaya kachka pontonov v zumpfakh ugolnykh razrezov (Lateral tossing pontoons in zumpfs of coal quarrys). Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2013. № 6. pp. 30–36.

9. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Analiz bokovoj kachki pontonov, primenyaemyh na ugolnyh razrezah (Analysis of the rolling motion of the pontoons used at the open-pit coal mines). Bezopasnost truda v promyshlennosti = Ocupational Safety in Industry. 2013. № 11. pp. 42–45.

10. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Matematicheskoe modelirovanie kachki pontona v zumpfe ugolnogo razreza (Mathematical modeling of pitching of the pontoon in zumpf of a coal mine). Vychislitelnye tekhnologii = Computational Technologies. 2014. Vol. 19. № 1. pp. 74–86.

11. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Ostojchivost i vynuzhdennaya kachka pontona v zumpfe ugolnogo razreza (Stability and pontoon forced pitching in the sump of an opencast coal mine). Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety. 2013. № 2. pp. 91–97.

12. Cherdantsev S.V. Postanovka zadachi o gravitacionnyh volnah zhidkosti v zumpfah ugolnyh razrezov (Statement of the problem of gravitational waves in fluid pump sump of coal cuts). Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2012. № 6. pp. 10–12.

13. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Kachka pontona na regulyarnom volnenii v zumpfe ugolnogo razreza (Pontoon rolling on regular waves in the sump of a coal quarry). Sibirskiy zhurnal industrialnoy matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2014. Vol. XVII. № 4. pp. 136–146.

14. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Analiz matematicheskoj modeli ustojchivosti pontona v processe ego vertikalno-bokovoj kachki v zumpfe ugolnogo razreza (Analysis of the mathematical model for stability of a pontoon in process of the vertically-lateral fluctuations in the sump of an open coal mine). Vychislitelnye tekhnologii = Computational Technologies. 2015. Vol. 20. № 2. pp. 79–90.

15. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Analiz kachki pontona s periodicheski izmenyayushchimisya parametrami ostojchivosti na vzvolnovannoj poverhnosti melkoj vody (Analysis of pontoon fluctuations with a seasonally changing parameter of stability on the astir surface of finite water depth). Sibirskiy zhurnal vychislitelnoy matematiki = Siberian Journal of Numerical Mathematics. 2016. Vol. 19. № 4. pp. 441–456.

16. Borisov R.V., Lugovskij V.V., Mirohin B.M., Rozhdestvenskij V.V. Statika korablya (Statics of the ship). SPb.: Sudostroenie, 2005. 256 p.

17. Semenov-Tyan-Shanskiy V.V. Statika i dinamika korablya (Ship dynamics and statics). L.: Sudostroenie, 1973. 607 p.

18. Zhukovskiy N.E. Teoreticheskaya mekhanika (Theoretical mechanics). M.: Gostekhizdat, 1952. 811 p.

19. Birger I.A., Mavlyutov R.R. Soprotivlenie materialov (Material resistance). M.: Nauka, 1986. 560 p.