

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАЛЛАСТНЫХ ЕМКостей МОБИЛЬНОГО ПРИЧАЛА ДЛЯ ПЕРЕВАЛКИ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ

С.В. Посыпанов, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [ABF-6542-2021](#),

ORCID: [0000-0003-0600-7089](#)

В.О. Чупраков, аспирант; *ResearcherID:* [ABF-4113-2021](#),

ORCID: [0000-0002-4265-2555](#)

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: s.posypanov@narfu.ru, slav.tchupr@yandex.ru

Оригинальная статья / Поступила в редакцию 12.12.20 / Принята к печати 19.02.21

Аннотация. Применение мобильного малогабаритного причала предложенной авторами ранее конструкции позволяет существенно расширить возможности и снизить затраты на перевалку лесоматериалов. При буксировке причала на существенные расстояния его балластные емкости пусты, что обеспечивает минимизацию осадки и сопротивления воды перемещению. У пункта выполнения работ выравнивающую балластную емкость заполняют водой до достижения горизонтальности верхней поверхности причала. В этом положении осуществляют его локальные перемещения в случае значительного изменения уровня воды в водоеме. Исходя из технологичности изготовления и минимизации объема выравнивающей емкости она сконструирована как отделенная вертикальной стенкой часть внутреннего пространства у кормы причала. В перестановочную балластную емкость заливают воду для погружения причала до опирания на спланированный береговой откос. Откачивают воду из нее для всплытия причала при его локальных перестановках. При этом не следует допускать существенного дифферента. Нижнюю точку продольного сечения перестановочной емкости предусмотрели на пересечении днища причала и вертикали, которая делит пополам ватерлинию при завершении выравнивания. Разработаны алгоритмы определения положения вертикальной стенки выравнивающей емкости, положения и формы стенок перестановочной емкости. Для условного причала единичных высоты и ширины установили расстояние указанной вертикальной стенки от нижней точки причала, координаты точек профилей левой криволинейной и правой стенок перестановочной емкости. По этим координатам получили эмпирические зависимости. По значениям вычисленных метацентрических высот убедились в обеспечении продольной и поперечной остойчивости причала во всех положениях. Экспериментальная проверка на физической модели причала подтвердила правильность результатов. Переход к нужным размерам продольного профиля от условных предполагается с сохранением пропорций.

Для цитирования: Посыпанов С.В., Чупраков В.О. Обоснование параметров балластных емкостей мобильного причала для перевалки лесоматериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 143–154. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

Ключевые слова: круглые лесоматериалы, мобильный причал, судовые перевозчики, погрузка лесоматериалов, балластные емкости.

JUSTIFICATION OF BALLAST TANK PARAMETERS OF A MOBILE BERTH FOR TIMBER TRANSSHIPMENT

Sergey V. Posypanov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Vyacheslav O. Chuprakov, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABF-4113-2021](https://orcid.org/0000-0002-4265-2555),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4265-2555>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnogo Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: s.posypanov@narfu.ru, slav.tchupr@yandex.ru

Original article / Received on December 12, 2020 / Accepted on February 19, 2021

Abstract. The use of a mobile small-sized berth, the design of which was proposed by the authors in the previous paper, significantly increases capacity and reduces the cost of timber transshipment. When towing the berth over large distances, its ballast tanks are empty, which ensures that draft and water resistance to movement are minimized. At the point of operation the leveling ballast tank is filled with water until the top surface of the berth is leveled. In this position, the berth is moved locally in case of significant changes of the water level in the reservoir. Due to manufacturability and minimization of the volume of the leveling tank, it is designed as a part of the inner space at the berth stern, separated by a vertical wall. The permutation ballast tank is filled with water to submerge the berth until it leans on the leveled coastal slope. Water is pumped out of the tank to make the berth float during its local permutations. In this case, a significant trim should not be allowed. The lower point of the longitudinal section of the permutation tank was provided at the intersection of the berth bottom and the vertical, which bisects the waterline upon completion of the alignment. Algorithms have been developed for determining the position of the vertical wall of the leveling tank and the position and shape of the walls of the permutation tank. The distance of the vertical wall from the lower point of the berth and the coordinates of the points of the profiles of the left curved and right walls of the permutation tank were determined for a conditional berth of unit height and width. The coordinates were used to derive empirical dependencies. The values of the calculated metacentric heights verified the longitudinal and transverse stability of the berth in all positions. Experimental validation on a physical model of the berth confirmed the correctness of the results. Transition to the correct dimensions of the longitudinal profile from the conditional is assumed with the proportions retained.

For citation: Posypanov S.V., Chuprakov V.O. Justification of Ballast Tank Parameters of a Mobile Berth for Timber Transshipment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2022, no. 1, pp. 143–154. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-143-154

Keywords: round timber, mobile berth, shipping, timber loading, ballast tanks.

Введение

Сотрудниками Северного (Арктического) федерального университета предложена конструкция мобильного малогабаритного причала, применение которой позволяет существенно расширить возможности и уменьшить затраты при осуществлении сброски сплочных единиц в воду [9], погрузке лесоматериалов на суда и других видах перевалки лесных грузов [4]. Сведения об указанной конструкции, технологиях применения причала, их преимуществах, об определении геометрических параметров его корпуса, гидродинамических характеристик приведены в работах [7, 8, 11, 12]. Внутри причала предусмотрены две балластные емкости, необходимые для его эффективного использо-

вания. Работ по обоснованию их параметров нет, в связи с чем сделан вывод о необходимости выполнения данной работы.

Цель исследования – обоснование геометрических характеристик выравнивающей и перестановочной балластных емкостей мобильного причала.

Объект – балластные емкости мобильного причала для перевалки лесоматериалов. *Метод* – теоретический с проверкой результатов на физической модели.

Результаты исследования и их обсуждение

При буксировке причала на существенные расстояния его балластные емкости пусты. Осадка причала и сопротивление воды его перемещению в этом случае минимальны, верхняя поверхность наклонена. У пункта выполнения работ причал приводят в положение, в котором осуществляется его перемещение при значительных изменениях уровня воды в водоеме. Для этого заполняют водой выравнивающую емкость до достижения горизонтальности верхней поверхности причала. Положение и форма этой емкости приняты исходя из технологичности ее изготовления и минимизации объема. При предварительных расчетах убедились, что вертикальная стенка данной емкости будет размещаться правее нижней точки корпуса причала (рис. 1).

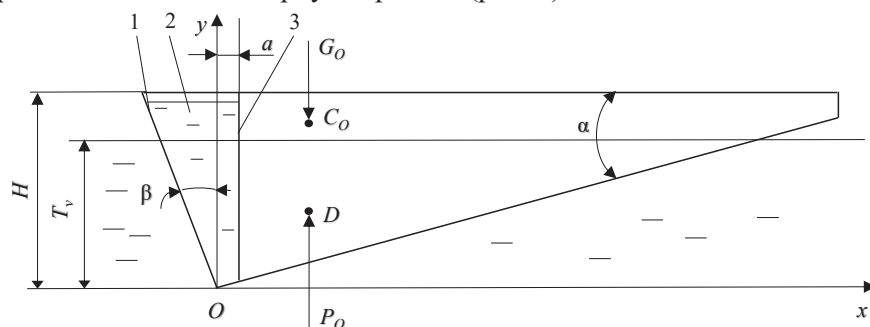


Рис. 1. Схема причала с заполненной выравнивающей емкостью: 1 – кормовая поверхность; 2 – выравнивающая емкость; 3 – вертикальная стенка емкости

Fig. 1. Scheme of the berth with the filled leveling tank: 1 – stern surface; 2 – leveling tank; 3 – tank vertical wall

Обосновывая параметры балластных емкостей, исходим из условия, что в рассматриваемом положении плавающего причала общий центр тяжести и центр водоизмещения лежат на вертикали, называемой осью плавания [16, 17]. Вместе с тем предполагается контроль устойчивости причала. Берем причал единичных ширины и высоты. При этом упрощаем математические выражения, чтобы в итоге легко пересчитать результаты под требуемые значения указанных параметров.

Формулы, позволяющие определять координаты центров тяжести и центров водоизмещения причала, получены с опорой на положения механики твердого тела [3, 19] и гидромеханики [1, 2]. В частности, для общего центра тяжести C_o выровненного причала (см. рис. 1) указанные формулы имеют вид

$$x_{co} = \frac{G_m x_m + G_{vl} x_{vl} + G_v x_v}{G_m + G_{vl} + G_v}; \quad (1)$$

$$y_{co} = \frac{G_m y_m + G_{vl} y_{vl} + G_v y_v}{G_m + G_{vl} + G_v}, \quad (2)$$

где G_m , G_{vl} , G_v – силы тяжести, соответствующие конструкциям причала, воде в емкости слева от оси Oy и справа от нее, Н; x_m , x_{vl} , x_v – абсциссы центров тяжести указанных составляющих, м; y_m , y_{vl} , y_v – ординаты обозначенных центров, м.

Для координат центра водоизмещения D причала в том же положении получены выражения:

$$x_D = T_v \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta}{3(\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}; \quad (3)$$

$$y_D = \frac{2T_v}{3}, \quad (4)$$

где T_v – осадка причала после его выравнивания, м; α – угол между верхней и нижней поверхностями, рад; β – угол наклона кормовой поверхности, рад.

Абсциссы центров тяжести:

$$x_{vl} = -\frac{1}{3} K_2 H \operatorname{tg} \beta; \quad (5)$$

$$x_v = \frac{a(K_2 H - 2a \operatorname{tg} \alpha / 3)}{2K_2 H - a \operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

где K_2 – коэффициент, учитывающий обеспечение резерва при заполнении емкости водой; a – расстояние между осью Oy и вертикальной стенкой емкости, м.

Коэффициент K_2 приравняли к 0,95.

Полагая, что масса конструкций причала распределена по площади его продольного сечения в целом равномерно, получили

$$x_m = \frac{1,3(L_v - H \operatorname{tg} \beta)^2 - H^2 \operatorname{tg}^2 \beta}{3,45(L_v - H \operatorname{tg} \beta) + 3H \operatorname{tg} \beta}, \quad (7)$$

где L_v – длина ватерлинии в выровненном положении, м; H – высота причала, м.

G_m с некоторой перестраховкой установили через удельную металлоемкость аналогов m_y . В качестве аналогов из-за отсутствия подобных причалов приняты баржи-площадки [2, 5, 6, 10, 13]. Для них определили значения m_y , используя выражение

$$m_y = \frac{M_b}{V_k},$$

где M_b – масса баржи-площадки, тыс. кг; V_k – объем ее корпуса, м³.

Выполнив аппроксимацию результатов, получили

$$m_y = 0,021 V_{kn}^2 - 0,115 V_{kn} + 0,293,$$

где V_{kn} – объем корпуса причала, тыс. м³.

Коэффициент детерминации [15] для этого уравнения равен 0,87.

Согласно полученным данным m_y возрастает с уменьшением объема корпуса. Экстраполируя приведенную выше зависимость до малых объемов, соответствующих объемам корпусов причалов, приняли для них удельную металлоемкость 300 кг/м³.

Корпус условного причала при ранее обоснованных пропорциях имеет объем 1,838 м³. Масса при принятой удельной металлоемкости – 532 кг, тогда $G_m = 5410$ Н. Для такого причала

$$G_{vl} = 0,5\rho g K_1 K_2 \text{tg}\beta; \quad (8)$$

$$G_v = \rho g a K_1 (K_2 - 0,5 \text{tg}\alpha), \quad (9)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; K_1 – коэффициент, учитывающий присутствие внутри емкости элементов каркаса, K_1 приравнивали к 0,95.

Выражение для определения силы Архимеда в данном случае имеет вид

$$P_o = 0,5 T_v^2 \rho g (\text{tg}\beta + \text{ctg}\alpha).$$

Эта сила равна суммарной силе тяжести

$$G_o = G_m + G_{vl} + G_v. \quad (10)$$

Из условия равенства P_o и G_o (см. рис. 1) у плавающего причала

$$T_v = \sqrt{\frac{G_o}{0,5\rho g (\text{tg}\beta + \text{ctg}\alpha)}}. \quad (11)$$

Прямого аналитического решения у задачи нет. Величину a выразить из данной системы уравнений невозможно. Разработали алгоритм численного решения [14, 18] с использованием компьютера. В ходе вычислений по этому алгоритму с помощью (5), (7), (8) при единичной высоте определяются значения x_{vl} , x_m , G_{vk} , которые при принятых нами ранее входных величинах оказались равными 0,085 м, 1,030 м, 1127 Н. Напомним, что $G_m = 5410$ Н.

Последующие вычисления осуществляются в цикле. Величине a присваивается нулевое значение с увеличением его в каждом цикле на 0,005 м. При текущем a согласно (6), (9) вычисляются x_v , G_v . Затем с помощью (1) определяется x_{co} и в соответствии с (10), (11) – осадка T_v . По формуле (3) вычисляется x_D . В конце цикла находится разность x_{co} и x_D . Цикл повторяется, пока эта разность не окажется равной 0 или очень близкому к нему значению. Результаты расчетов заключительного цикла фиксируются.

Получили $a = 0,160$ м, $T_v = 0,656$ м, $x_D = 0,704$ м, $x_{co} = 0,705$ м.

Дальнейшие вычисления выполняют для оценки остойчивости выровненного причала:

$$y_{vl} = 2K_2 H / 3;$$

$$y_v = \frac{(K_2 H - \text{tg}\alpha)(0,5K_2 H + \text{tg}\alpha) + a^2 \text{tg}^2 \alpha / 3}{K_2 H - 0,5 \text{tg}\alpha};$$

$$y_m = \frac{H(2\text{tg}\beta + 1,859 \text{ctg}\alpha)}{3\text{tg}\beta + 2,933 \text{ctg}\alpha}.$$

При единичной высоте $y_{vl} = 0,633$ м, $y_v = 0,509$ м, $y_m = 0,661$ м. Согласно (2) и (4), $y_{co} = 0,630$ м, $y_D = 0,437$ м.

Для метацентрической высоты [17] выровненного причала по дифференту получено выражение

$$h_{m1} = \frac{L_v^3}{6T_v^2 (\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)} - 0,193H,$$

по крену

$$h_{m2} = \frac{L_v B^2}{6T_v^2 (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)} - 0,193H;$$

$$L_v = T_v (\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta).$$

При единичных высоте и ширине $L_v = 2,464$ м, $h_{m1} = 1,349$ м, $h_{m2} = 0,223$ м. Метацентрические высоты положительны – причал устойчив даже при условной единичной ширине, которая фактически существенно больше.

Если фактическое значение m_y окажется меньше 300 кг/м^3 (превышать не рекомендовано), то для выравнивания причала при той же емкости потребуется меньше воды.

В перестановочную емкость заливают воду для погружения причала до опирания на спланированный береговой откос. Для всплытия причала при локальных перестановках в случаях существенного изменения уровня воды в водоеме откачивают воду. При этом не следует допускать существенного дифферента.

Наиболее рациональное расположение перестановочной емкости отражено на рис. 2. При очень небольшом наполнении этой емкости осадка причала возрастет на еще меньшую величину T_d (рис. 2). Равнодействующая приращения силы Архимеда P_d в случае бесконечно малого T_d лежит на вертикали, проходящей по середине ватерлинии причала. Дифферент не возникнет, если равнодействующая силы тяжести G_d воды, залитой в указанную емкость, будет находиться на одной линии с P_d . Учитывая изложенное, нижнюю точку профиля перестановочной емкости разместили на указанной линии у днища причала. Справа от этой линии донной частью емкости является обшивка корпуса причала, слева форму стенки емкости определили из условия отсутствия дифферента.

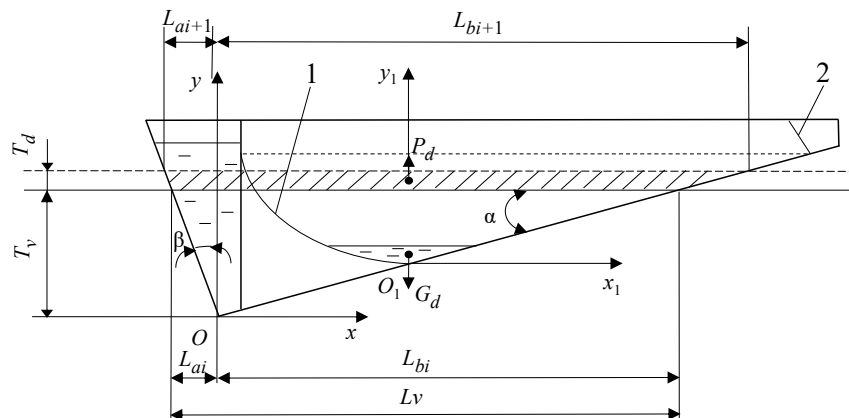


Рис. 2. Продольный профиль причала с перестановочной емкостью: 1 – криволинейная часть стенки перестановочной емкости; 2 – правая стенка перестановочной емкости

Fig. 2. Longitudinal profile of the berth with the permutation tank: 1 – curved part of the permutation tank wall; 2 – right wall of the permutation tank

Здесь целесообразно использовать систему координат $x_1O_1y_1$ (см. рис. 2). Ее связь с системой xOy осуществляется с помощью выражений:

$$x_{O_1} = 0,5L_v - T_v \operatorname{tg}\beta;$$

$$y_{O_1} = T_v - 0,5L_v \operatorname{tg}\alpha,$$

где x_{O_1}, y_{O_1} – координаты точки O_1 в системе xOy .

Для установления формы левой стенки перестановочной емкости разработали алгоритм численного решения задачи, реализовав его на компьютере. Алгоритм включает два цикла. Во внешнем из них уровень в перестановочной емкости увеличивается на $\Delta y_1 = 0,05H$, во внутреннем определяется положение точки профиля левой стенки при данном уровне, т. е. Δl_{i+1} (рис. 3).

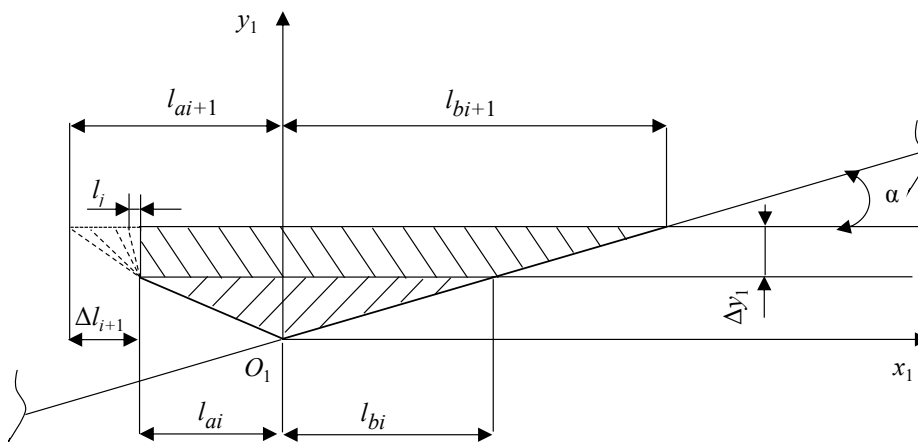


Рис. 3. Схема определения профиля криволинейной части стенки перестановочной емкости

Fig. 3. Scheme for determining the profile of the curved part of the permutation tank wall

При каждом прохождении внутреннего цикла Δl_{i+1} увеличивается на 0,001 м. Далее по приведенной ниже формуле определяется объем воды в данном слое высотой Δy_1 при текущем положении точки профиля левой стенки емкости:

$$V_{Ti} = 0,5\Delta y_1 K_1 (l_{ai} + l_{bi} + l_{ai+1} + l_{bi+1}),$$

где l_{ai}, l_{ai+1} – расстояния от оси O_1y_1 по горизонтали до точек профиля левой стенки емкости на предшествующем и данном уровнях; l_{bi}, l_{bi+1} – расстояния от оси O_1y_1 по горизонтали до правой стенки емкости на предшествующем и данном уровнях.

В первом цикле l_{ai}, l_{bi} равны 0, тогда

$$l_{bi+1} = l_{bi} + \Delta y_1 \operatorname{ctg}\alpha; \quad (12)$$

$$l_{ai+1} = l_{ai} + \Delta l_{i+1}. \quad (13)$$

Увеличение количества воды в емкости на V_{Ti} приводит к аналогичному увеличению водоизмещения причала. Это увеличение водоизмещения V_{di} связано с увеличением осадки причала выражением

$$W_{di} = L_{di} T_{di} + 0,5(\operatorname{ctg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) T_{di}^2, \quad (14)$$

где L_{di} – длина продольной ватерлинии причала при предшествующем заполнении перестановочной емкости, м; T_{di} – приращение осадки, м.

Расчет емкости начинается при $L_{di} = L_v$.

По выражению, полученному из (14), вычисляется приращение осадки

$$T_{di} = \frac{\sqrt{L_{di}^2 + 2W_{di}(\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)} - L_{di}}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta}. \quad (15)$$

Далее определяются абсциссы центров, добавленных на шаге Δy_1 , водоизмещения и тяжести воды в емкости соответственно по формулам:

$$x_{di} = \frac{L_{bi}^2 + T_{di}(L_{bi} + T_{di}\text{ctg}\alpha/3)\text{ctg}\alpha - L_{ai}^2 - T_{di}(L_{ai} + T_{di}\text{tg}\beta/3)\text{tg}\beta}{2(L_{bi} + L_{ai}) + T_{di}(\text{ctg}\alpha + \text{tg}\beta)}; \quad (16)$$

$$x_{ci} = \frac{l_{bi}^2 + \Delta y_1(l_{bi} + \Delta y_1\text{ctg}\alpha/3)\text{ctg}\alpha - l_{ai}^2 - \Delta l_i(l_{ai} + \Delta l_{i+1}/3)}{2(l_{bi} + l_{ai}) + \Delta y_1\text{ctg}\alpha + \Delta l_i}, \quad (17)$$

где l_{ai} , l_{bi} – длины частей продольной ватерлинии соответственно по левую и правую сторону от оси Oy при предшествующем заполнении перестановочной емкости. В начале вычислений $L_{bi} = T_v\text{ctg}\alpha$, $L_{ai} = T_v\text{tg}\beta$.

Определяется разность x_{di} и x_{ci} . Цикл повторяется с увеличением Δl_{i+1} , пока эта разность не окажется равной 0 или очень близкой к нему. При этом условии осуществляется выход из внутреннего цикла. Фиксируются полученные при заключительном прохождении внутреннего цикла T_{di} , l_{bi+1} , l_{ai+1} , V_{Ti} , x_{ci} и x_{di} . Далее суммированием по нарастающей определяются общее приращение осадки T_d , осадка T_O как сумма T_d и T_v , высота наполнения y_{1i} и объем воды V_{TOi} в перестановочной емкости. Вычисляются L_{ai+1} , L_{bi+1} :

$$L_{ai+1} = T_O\text{tg}\beta;$$

$$L_{bi+1} = T_O\text{ctg}\alpha,$$

а также L_{di+1} как сумма этих величин. Для расчетов в следующих циклах величинам L_{ai} , L_{bi} , L_{di} , l_{ai} , l_{bi} присваиваются значения L_{ai+1} , L_{bi+1} , L_{di+1} , l_{ai+1} , l_{bi+1} соответственно.

По завершении внешнего цикла выполняются расчеты для контроля остойчивости причала. Для этого в системе xOy последовательно по формулам определяются ординаты центров тяжести верхнего слоя воды высотой Δy_1 , всей воды в перестановочной емкости и причала с водой в обеих емкостях:

$$y_{cvi} = y_{Oi} + y_{1i} + \frac{\Delta y_1(l_{ai} + l_{bi} + 2(l_{ai+1} + l_{bi+1} - l_{ai} - l_{bi})/3)}{l_{ai} + l_{ai+1} + l_{bi} + l_{bi+1}}; \quad (18)$$

$$y_{ocvi} = \frac{\sum y_{cvi} V_{Ti}}{V_{TOi}};$$

$$y_{covi} = \frac{G_O y_{co} + y_{ocvi} V_{TOi} \rho g}{G_O + V_{TOi} \rho g}.$$

По формуле (4) вычисляется ордината центра водоизмещения y_{Di} при текущей осадке T_O . Соответствующие метацентрические высоты по дифференту и по крену причала при условной единичной ширине находятся по выражениям:

$$h_{m1i} = \frac{L_{di}^3}{12(G_O/(\rho g) + V_{TOi})} - y_{covi} + y_{Di};$$

$$h_{m2i} = \frac{L_{di} B^2}{12(G_O/(\rho g) + V_{TOi})} - y_{covi} + y_{Di}.$$

Криволинейная часть профиля перестановочной емкости примыкает к вертикальной стенке соседней емкости (см. рис. 2). Условие, при котором происходит это примыкание, имеет вид

$$l_{a+1} = 0,5L_v - T_v \operatorname{tg}\beta - a.$$

Отсутствие дифферента при заполнении перестановочной емкости выше точки примыкания в связи с вертикальностью левой стенки обеспечивается благодаря соответствующему профилю правой (см. рис. 2). В алгоритм расчетов при этом вносятся несущественные изменения. В частности, вместо (13) используется равенство

$$l_{a+1} = l_{ai};$$

вместо (12) –

$$l_{bi+1} = l_{bi} - \Delta l_i;$$

вместо (17) –

$$x_{ci} = \frac{(l_{bi} - \Delta l_i)^2 + 2(l_{bi} - 2\Delta l_i/3) - l_{ai}^2}{2l_{bi} - \Delta l_i + 2l_{ai}};$$

вместо (18) –

$$y_{cvi} = y_{Oi} + y_{li} + \frac{\Delta y_1 (l_{ai+1} + l_{bi+1} + (l_{ai} + l_{bi} - l_{ai+1} - l_{bi+1})/3)}{l_{ai} + l_{ai+1} + l_{bi} + l_{bi+1}}.$$

Когда осадка T_O начинает превышать $0,85H$, подводная часть корпуса причала справа ограничивается вертикальной поверхностью. В связи с этим (14) заменяется выражением

$$W_{di} = L_{di} T_{di} + 0,5 \operatorname{tg}\beta T_{di}^2.$$

Соответственно, (15) – формулой

$$T_{di} = \frac{\sqrt{L_{di}^2 + 2W_{di} \operatorname{tg}\beta} - L_{di}}{\operatorname{tg}\beta},$$

а (16) –

$$x_{di} = \frac{L_{bi}^2 - L_{ai}^2 + T_{di} (L_{ai} - T_{di} \operatorname{tg}\beta/3) \operatorname{tg}\beta}{2(L_{bi} + L_{ai}) + T_{di} \operatorname{tg}\beta}.$$

Величина L_{bi} далее не меняется. Расчеты продолжаются до выполнения условия $T_O = H$, при котором верхняя поверхность причала оказывается на уровне забортной воды.

Выполнив расчеты, нашли координаты совокупности точек профиля левой криволинейной части и правой стенки перестановочной емкости. При этом учли, что l_{bi} , l_{ai} равны абсциссам соответствующих точек в системе $x_1 O_1 y_1$,

первое со знаком минус. По этим точкам в результате аппроксимации получили зависимости для криволинейной части левой стенки

$$y_1 = 0,292x_1^2 + 0,203x_1 + 0,04,$$

для правой стенки

$$y_1 = -5,937x_1 + 9,287.$$

Достоверность аппроксимации [20] для обоих выражений – 0,999.

Эти два уравнения и рис. 2 в полной мере характеризуют форму, размеры и положение перестановочной емкости.

Плавучесть причала сохраняется, пока уровень в перестановочной емкости не поднимется до $y_1 = 0,661H$, при этом приращение осадки к начальной после выравнивания составит $0,346H$.

Расчеты позволили установить, что при любой осадке выровненный причал сохраняет и продольную, и поперечную остойчивость при реальных соотношениях ширины, длины и высоты.

Продольный профиль балластных емкостей и корпуса причала, предложенный нами, является базовым. Изменение формы этого профиля считаем нецелесообразным. Переход от базовых размеров к нужным предполагается при сохранении пропорций. В случае необходимости их изменения можно обратиться к методике, описанной в статье.

Экспериментальная проверка на модели причала, изготовленной в масштабе 1:20, подтвердила правильность результатов, полученных теоретическим путем при обосновании геометрических параметров балластных емкостей причала.

Выводы

1. Положение и форму выравнивающей балластной емкости приняли исходя из технологичности ее изготовления и минимизации объема. Положение ее вертикальной стенки установили численным методом с помощью разработанного авторами алгоритма.

2. Предложили наиболее рациональный вариант расположения перестановочной емкости. Используя численный метод решения, с помощью разработанного авторами алгоритма обосновали ее основные геометрические параметры. Получили аппроксимирующие зависимости, описывающие форму и положение стенок перестановочной емкости.

3. В ходе выполнения расчетов убедились, что при любой осадке выровненный причал сохраняет и продольную, и поперечную остойчивость при реальных соотношениях ширины, длины и высоты.

4. Экспериментальная проверка на физической модели причала подтвердила правильность результатов, полученных теоретическим путем.

5. Разработанные материалы необходимы при проектировании мобильных причалов, применение которых позволяет существенно расширить возможности и снизить затраты при осуществлении перевалки лесных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К.* Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 455 с. *Voytkunskiy Ya.I., Faddeyev Yu.I., Fedyayevskiy K.K.* *Hydromechanics.* Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1982. 455 p.

2. Войткунский Я.И., Иванов А.Н., Луговский В.В. и др. Справочник по теории корабля: В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. 764 с. Voytkunskiy Ya.I., Ivanov A.N., Lugovskiy V.V. et al. *Handbook of Ship Theory*: In 3 Vol. Vol. 1. Hydromechanics. Ship Motion Resistance. Ship Propulsion Systems. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1985. 764 p.

3. Голдстейн Г. Классическая механика. М.: Наука, 1975. 415 с. Goldstein H. *Classical Mechanics*. Translated from English. Moscow, Nauka Publ., 1975. 415 p.

4. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса. М.: Акад. естествознания, 2009. 236 с. Korpachev V.P. *Theoretical Foundations of Waterborne Transportation of Timber*. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2009. 236 p.

5. Лебедев Н.И. Лесосплавной флот. М.: МГУЛ, 2003. 205 с. Lebedev N.I. *Timber Rafting Fleet*. Moscow, MGUL Publ., 2003. 205 p.

6. Минаев А.Н., Беленов И.А., Козленков Н.И. Лесосплавной флот. М.: Экология, 1991. 272 с. Minayev A.N., Belenov I.A., Kozlenkov N.I. *Timber Rafting Fleet*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 272 p.

7. Посыпанов С.В. Технологические схемы погрузки лесоматериалов на суда с использованием мобильного малогабаритного причала // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2(13-2). С. 313–317. Posypanov S.V. Technological Schemes of Loading Timber on Ships with Use of the Mobile Small-Sized Berth. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2015, vol. 3, no. 2-2(13-2), pp. 313–317.

8. Посыпанов С.В., Чупраков В.О. Применение мобильных малогабаритных причалов при выгрузке круглых лесоматериалов из воды // Аллея Науки. 2018. Т. 5, № 6(22). С. 285–288. Posypanov S.V., Chuprakov V.O. The Use of Mobile Small-Sized Berths for Unloading Round Timber out of Water. *Alleya nauki* [Alley-Science], 2018, vol. 5, no. 6(22), pp. 285–288.

9. Суров Г.Я., Зунин Л.Н. Организация береговой сплотки. Архангельск: АГТУ, 2006. 75 с. Surov G.Ya., Zunin L.N. *Organization of Coastal Rafting*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2006. 75 p.

10. Суров Г.Я., Барабанов В.А., Рымашевский В.Л. Перевозки лесных грузов в судах внутреннего плавания. Архангельск: САФУ, 2010. 208 с. Surov G.Ya., Barabanov V.A., Rymashevskiy V.L. *Timber Cargo Transportation in Inland Navigation Vessels*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 208 p.

11. Чупраков В.О., Посыпанов С.В. Результаты исследования взаимодействия мобильного малогабаритного причала с водной средой при его буксировке // Изв. СПбЛТА, 2020. Вып. 233. С. 152–165. Chuprakov V.O., Posypanov S.V. Research Findings of an Relocatable Small Size Pontoon Pier Interaction with the Aquatic Medium during Its Towing. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2020, is. 233, pp. 152–165. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.152-165>

12. Чупраков В.О., Посыпанов С.В. Обоснование геометрических параметров мобильного малогабаритного причала для перевалки лесных грузов // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. Воронеж: ВГЛУТ им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 154–159. Chuprakov V.O., Posypanov S.V. Justification of Geometric Parameters of a Mobile Small-Sized Way for Transshipment of Timber Cargo. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Modern Machines, Equipment and IT Solutions for Industrial Complex: Theory and Practice"*. Voronezh, VSUFT Publ., 2021, pp. 154–159. DOI: https://doi.org/10.34220/MMEITSIC2021_154-159

13. Якишаров П.С. Малые стальные суда. Л.: Судостроение, 1986. 168 с. Yaksharov P.S. *Small Steel Vessels*. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1986. 168 p.
14. Atkinson K.E. *An Introduction to Numerical Analysis*. New York, Wiley, 1989. 657 p.
15. Griffith A. *SPSS for Dummies*. Hoboken, NJ, Wiley, 2007. 360 p.
16. Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics*. Dordrecht, Springer, 2010. 620 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8670-0>
17. Larsson L., Stern F., Visonneau M. *Numerical Ship Hydrodynamics*. Dordrecht, Springer, 2014. 318 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7189-5>
18. Riley K.F., Hobson M.P., Bence S.J. *Mathematical Methods for Physics and Engineering*. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 1359 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810763>
19. Symon K.R. *Mechanics*. Addison-Wesley, 1971. 639 p.
20. Weisberg S. *Applied Linear Regression*. Hoboken, NJ, Wiley, 2005. 329 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471704091>