

doi: 10.5862/MCE.55.7

Воздействие морских волн на судно, ошвартованное у причала с камерой гашения

*К.т.н., доцент К.К. Семенов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
старший преподаватель В.А. Леонтьев,
д.т.н., профессор И.С. Нуднер,
Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова*

Аннотация. При проектировании причальных сооружений и систем раскрепления судов у причалов требуется обеспечить выполнение условий на возможные перемещения судна. Для обоснованного выбора конструктивного решения требуется оценить характеристики воздействия морских волн на судно с учетом возникающего волнового режима. Для инженерных изысканий удобно использовать результаты численных расчетов.

В работе представлена математическая модель для расчета воздействия волн на судно, ошвартованное у причала, содержащего камеру гашения. Для построения модели применялся аналитический метод, использующий разложение по собственным функциям.

Представлены результаты расчетов, демонстрирующие влияние характеристик причала на нагрузки, испытываемые судном.

Ключевые слова: причал; камера гашения; швартовка судна; воздействие морских волн

Введение

В настоящее время в морском гидротехническом строительстве все чаще применяются частично проницаемые конструкции берегозащитных и причальных сооружений [1]. Их волногасящие свойства обеспечиваются использованием камер гашения, лицевая часть которых представляет собой решетчатые конструкции из свайных рядов. Безопасная стоянка судов у таких причалов и безаварийное проведение погрузочно-разгрузочных работ достигаются надежной системой раскрепления, схема и параметры которой назначаются с учетом действующих на судно гидродинамических сил. Наличие причала может оказывать существенное влияние на значения действующих со стороны жидкости сил. Данная работа посвящена определению взаимосвязи гидродинамических сил (возмущающих и инерционно-демпфирующих) с геометрическими параметрами и физическими характеристиками причала, включающего камеру гашения.

Обзор литературы

Воздействие морских волн на судно, расположенное у причала, определяет выбор схемы и элементов систем раскрепления, обеспечивающих выполнение условий по допускаемым перемещениям судна при выполнении на нем погрузочно-разгрузочных работ. При проектировании возникает необходимость в определении характеристик гидродинамических воздействий на судно [2]. При этом следует учитывать конструкцию причала. Искомые значения гидродинамических характеристик, как правило, получают с помощью численного или физического моделирования.

Экспериментальное исследование воздействия морских волн на судно, ошвартованное у причала, достаточно трудоемко и сопряжено с определенными сложностями в обеспечении подобия между результатами, достигнутыми в рамках физической модели, и их натурными аналогами [3–5].

К настоящему моменту основными методами математического описания подобных задач являются [6]: аналитические методы разложения по собственным функциям или построения функций Грина, численно-аналитические методы систем дискретных источников и численные методы на разностных схемах. Перечисленные методы применяются при решении задач [7–11], близких к рассматриваемой в данной статье, и позволяют достичь приемлемой точности результатов расчета.

Известны работы, посвященные воздействию волн на одиночное судно [12, 13], на судно, расположенное у причала с непроницаемой вертикальной стенкой [14], у проницаемой преграды [15, 16], у сооружения откосного профиля [17, 18]. Публикации о нагрузках на судно,

Семенов К.К., Леонтьев В.А., Нуднер И.С. Воздействие морских волн на судно, ошвартованное у причала с камерой гашения

расположенное у причала с камерой гашения, авторам неизвестны. В то же время есть практическая необходимость в рассмотрении таких вопросов. Настоящая работа посвящена решению задачи о воздействии волн на судно, расположенное у причала с камерой гашения. Представленные результаты могут быть использованы для получения инженерных рекомендаций при проектном рассмотрении систем раскрепления судов у причальных сооружений.

Постановка задачи

Взаимодействие волн с ошвартованным у причала судном исследуется при следующих предположениях: дно акватории считается горизонтальным, жидкость – идеальной и несжимаемой, ее движение – потенциальным и установившимся. Рассматривается плоская линейная задача. Судно схематизируется цилиндрическим телом прямоугольного сечения неограниченной протяженности. Причал представляет собой камеру гашения с вертикальными лицевой тонкой (пористой) и тыльной (непроницаемой) стенками.

Вводится декартова система координат Oxz , ось Ox которой совпадает с направлением распространения волн. Ось Oz проходит через центр тяжести судна вертикально вверх. Расположение судна у причала и обозначения геометрических размеров приведены на рисунке 1.

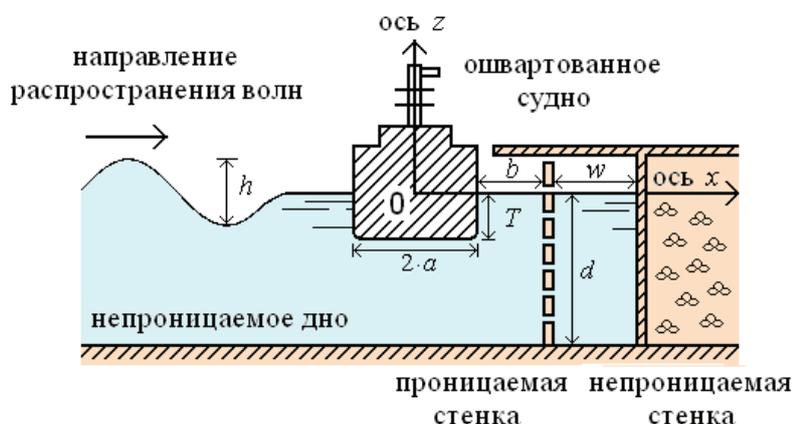


Рисунок 1. Схема расположения судна у причала

В силу линейности задача о воздействии морских волн на плавающее судно распадается на две [19]: задачу определения гидродинамических (возмущающих и инерционно-демпфирующих) сил, действующих на судно, и задачу определения параметров возникающей качки. Первая задача сводится к решению краевой задачи для уравнения Лапласа при соответствующих граничных условиях, вторая – к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение судна.

Набегающие из бесконечности волны будем описывать потенциалом скорости

$$\Phi^{(0)}(x, z, t) = A \cdot \operatorname{ch}[k_0 \cdot (z + d)] \cdot e^{-i(k_0 \cdot x - \sigma t)}, \quad (1)$$

где $A = \frac{g \cdot h \cdot i}{2 \cdot \sigma \cdot \operatorname{ch}(k_0 \cdot d)}$ – комплексная амплитуда; h , σ и λ – высота, частота и длина волн

соответственно; $k_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ – волновое число; g – ускорение свободного падения; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Частота волн, волновое число и местная глубина жидкости связаны между собой дисперсионным соотношением

$$\sigma^2 = g \cdot k_0 \cdot \operatorname{th}(k_0 \cdot d). \quad (2)$$

При взаимодействии набегающих волн с ошвартованным у причала судном часть волн отражается от преград, распространяясь в обратном направлении. Набегающие волны вызывают колебания судна, которое является дополнительным источником возникновения волн. Суммарное волновое поле будет описываться функцией [19, 20]:

$$\Phi(x, z, t) = \Phi^{(0)}(x, z, t) + \Phi^{(1)}(x, z, t) + \Phi^{(2)}(x, z, t), \quad (3)$$

где $\Phi^{(1)}(x, z, t)$ – дифракционный потенциал скорости, описывающий движение жидкости, вызванное присутствием судна как неподвижной преграды при набегании на него исходных волн; $\Phi^{(2)}(x, z, t)$ – потенциал скорости, описывающий волновое движение, обусловленное вынужденными колебаниями судна при отсутствии набегающих на судно волн. В этом случае исходную задачу можно представить в виде двух задач: дифракционной задачи для функции $\Phi^{(1)}(x, z, t)$ и гидродинамической задачи для функции $\Phi^{(2)}(x, z, t)$, которые можно решать независимо одна от другой.

Функция $\Phi(x, z, t)$ удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

и следующим граничным условиям:

- кинематическому и динамическому на свободной поверхности, объединенным в одно условие

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0; \quad (5)$$

- непротекания через непроницаемые поверхности дна и причала

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \quad z = -d, \quad x \leq a + b + w; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0, \quad x = a + b + w, \quad z \in [-d, 0], \quad (7)$$

где n – нормаль к непроницаемой поверхности;

- непротекания через поверхность S колеблющегося судна

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = u_n, \quad (x, z) \in S, \quad (8)$$

где $u_n(x, z, t)$ – нормальная составляющая скорости судна:

$$u_n(x, z, t) = [u_x \cdot \cos(n, x) + u_z \cdot \cos(n, z) + \omega \cdot (x \cdot \cos(n, z) - z \cdot \cos(n, x))] \cdot \exp(i \cdot \sigma \cdot t), \quad (9)$$

где u_x, u_z – проекции скорости судна на оси Ox и Oz ; ω – угловая скорость колебаний судна относительно оси Oy , перпендикулярной плоскости Oxz ; $\cos(n, x), \cos(n, z)$ – направляющие косинусы нормали n ;

- на пористой стенке причала

$$\frac{\partial \Phi_-}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_+}{\partial x} = \beta \cdot (\Phi_+ - \Phi_-), \quad (10)$$

где Φ_-, Φ_+ – значения потенциала скорости на лицевой и тыльной гранях пористой стенки; β – коэффициент, зависящий от коэффициентов сопротивления f пористой стенки, пористости ε и присоединенной массы C_m , а также от ее условной толщины b_w [21];

- на бесконечном удалении от судна (условие Зоммерфельда)

$$\Phi = \left(A \cdot e^{-i \cdot k_0 \cdot x} + [A_0 + C_0] \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot x} \right) \cdot \text{ch}(k_0 \cdot (z + d)) \cdot e^{i \cdot \sigma \cdot t}, \quad x \rightarrow -\infty, \quad (11)$$

где A_0 – амплитуда отраженной волны от неподвижного судна и причала; C_0 – амплитуда волны, излучаемой колеблющимся судном при отсутствии набегающих волн.

С учетом равенства (3) потенциал скорости $\Phi^{(1)}(x, z, t)$ определяется из соотношений (4)–(11) в предположении неподвижности судна (то есть в (9) нормальная составляющая скорости $u_n = 0$ и судно не излучает волн, $C_0 = 0$). Потенциал $\Phi^{(2)}(x, z, t)$ определяется из задачи (4)–(11) в предположении, что отсутствуют набегающие и отраженные волны ($A = A_0 = 0$).

Метод решения

Для решения задачи область Ω , занятая жидкостью, представляется в виде прямоугольных подобластей Ω_j ($j = 1, 2, 3, 4$) (рис. 2).

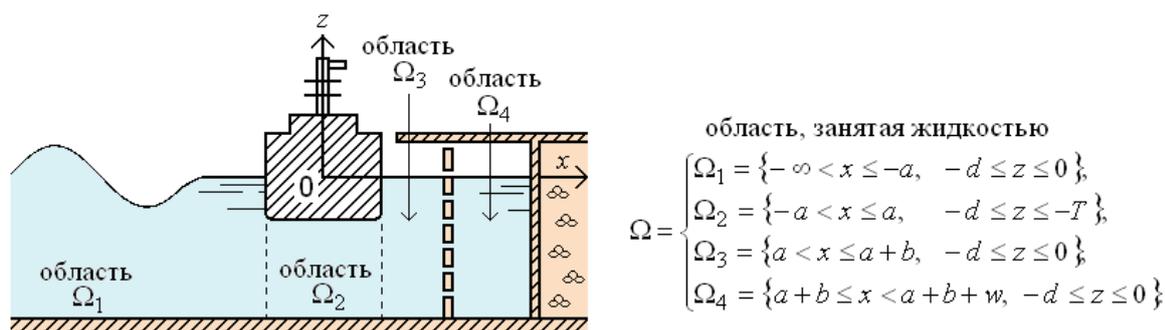


Рисунок 2. Разбиение области, занятой жидкостью

В каждой из областей Ω_j функции $\Phi^{(1)}$ и $\Phi^{(2)}$ определяются методом разделения переменных. Для функции $\Phi(x, z, t) = \Phi^{(0)}(x, z, t) + \Phi^{(1)}(x, z, t) + \Phi^{(2)}(x, z, t)$ в областях Ω_j получим следующие выражения:

$$\Phi_1 = \left[A \cdot e^{-K_0 \cdot x} \cdot \cos [K_0 \cdot (z + d)] + \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^{(1)} + C_n^{(1)}] \cdot e^{K_n \cdot x} \cdot \cos [K_n \cdot (z + d)] \right] \cdot e^{i \cdot \sigma t}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & \left[[A_0^{(2)} + C_0^{(2)}] \cdot x + B_0^{(2)} + D_0^{(2)} + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot (x + a)}{2 \cdot a} \cdot \operatorname{ch} \frac{n \cdot \pi \cdot (z + d)}{2 \cdot a} + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \left([A_n^{(2)} + C_n^{(2)}] \cdot e^{\frac{n \cdot \pi \cdot x}{d - T}} + [B_n^{(2)} + D_n^{(2)}] \cdot e^{-\frac{n \cdot \pi \cdot x}{d - T}} \right) \cdot \cos \frac{n \cdot \pi \cdot (z + d)}{d - T} \right] \cdot e^{i \cdot \sigma t}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\Phi_3 = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^{(3)} + C_n^{(3)}] \cdot e^{K_n \cdot x} + [B_n^{(3)} + D_n^{(3)}] \cdot e^{-K_n \cdot x} \cdot \cos [K_n \cdot (z + d)] \cdot e^{i \cdot \sigma t}, \quad (14)$$

$$\Phi_4 = \sum_{n=0}^{\infty} [B_n^{(4)} + D_n^{(4)}] \cdot \operatorname{ch} [K_n \cdot (x - a - b - w)] \cdot \cos [K_n \cdot (z + d)] \cdot e^{i \cdot \sigma t}, \quad (15)$$

где $G_n = \frac{v_z \cdot a \cdot |1 - (-1)^n| - \omega \cdot a^2 \cdot |1 + (-1)^n|}{\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)^2 \cdot \sinh \frac{n \cdot \pi \cdot (d - T)}{2 \cdot a}}$; $K_0 = i \cdot k_0$; значения K_n – положительные корни

уравнения $\sigma^2 = g \cdot K \cdot \operatorname{tg} (K \cdot d)$, решенного относительно K , упорядоченные по возрастанию ($n = 1, 2, \dots$), $K_1 < K_2 < \dots$; комплексные коэффициенты $A_n^{(j)}$, $B_n^{(j)}$, $C_n^{(j)}$, $D_n^{(j)}$ ($j = 1, 2, 3, 4$; $n = 0, 1, 2, \dots$) – неизвестные.

Пары коэффициентов $A_n^{(j)}$ и $B_n^{(j)}$ определяют потенциал $\Phi^{(1)}(x, z, t)$, а $C_n^{(j)}$ и $D_n^{(j)}$ – потенциал $\Phi^{(2)}(x, z, t)$. Соотношения (12)–(15) описывают функцию $\Phi^{(1)}(x, z, t)$, если положить $C_n^{(j)} = D_n^{(j)} = 0$ ($j = 1, 2, 3, 4; n = 0, 1, 2, \dots$) и $u_x = u_z = \omega = 0$, и функцию $\Phi^{(2)}(x, z, t)$ при условии, что $A_n^{(j)} = B_n^{(j)} = 0$ ($j = 1, 2, 3, 4, n = 0, 1, 2, \dots$) и $A = 0$.

Для определения неизвестных коэффициентов используются условия равенства давлений $p_j(x, z, t)$ и скоростей $v_j(x, z, t)$ ($j = 1, 2, 3$) на жидких границах подобластей Ω_1 и Ω_2 , Ω_2 и Ω_3

$$p_1(-a-0, z, t) = p_2(-a+0, z, t), \quad v_1(-a-0, z, t) = v_2(-a+0, z, t), \quad (16)$$

$$p_2(a-0, z, t) = p_3(a+0, z, t), \quad v_2(a-0, z, t) = v_3(a+0, z, t), \quad (17)$$

условия непротекания жидкости через стенки контура судна и условие (10) на пористой стенке.

Используя свойство ортогональности собственных функций и условия (10), (16), (17), можно получить следующую систему алгебраических уравнений:

$$x_m^{(1)} \cdot e^{-K_m \cdot a} \cdot J_m - x_0^{(2)} \cdot (d-T) \cdot I_{0m} - \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \pi \cdot \left(x_n^{(2)} \cdot e^{\frac{n \cdot \pi \cdot a}{d-T}} - y_n^{(2)} \cdot e^{\frac{n \cdot \pi \cdot a}{d-T}} \right) \cdot I_{nm} =$$

$$= r_{1m} \cdot \left[A \cdot e^{K_0 \cdot a} + u_x \cdot J'_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_z \cdot a \cdot [1 - (-1)^n] - \omega \cdot a^2 \cdot [1 + (-1)^n]}{n \cdot \pi \cdot \text{sh} \frac{n \cdot \pi \cdot (d-T)}{2 \cdot a}} \cdot I'_{n0} - \omega \cdot J''_0 \right], \quad (18)$$

$$x_0^{(1)} \cdot e^{-K_0 \cdot a} \cdot I_{00} + x_0^{(2)} \cdot a - y_0^{(2)} + \sum_{n=1}^{\infty} x_n^{(1)} \cdot e^{-K_n \cdot a} \cdot I_{n0} = -A \cdot e^{K_0 \cdot a} \cdot I_{00}, \quad (19)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} x_n^{(1)} \cdot e^{-K_n \cdot a} \cdot I_{nm} - \frac{1}{2} \cdot x_m^{(2)} \cdot r_{2m} \cdot e^{\frac{m \cdot \pi \cdot a}{d-T}} - \frac{1}{2} \cdot y_m^{(2)} \cdot r_{3m} \cdot e^{\frac{m \cdot \pi \cdot a}{d-T}} = -A \cdot e^{K_0 \cdot a} \cdot I_{0m}, \quad (20)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \pi \cdot \left(x_n^{(2)} \cdot e^{\frac{n \cdot \pi \cdot a}{d-T}} - y_n^{(2)} \cdot e^{\frac{n \cdot \pi \cdot a}{d-T}} \right) \cdot I_{nm} - (x_m^{(3)} \cdot e^{K_m \cdot a} - y_m^{(3)} \cdot e^{-K_m \cdot a}) \cdot J_m +$$

$$+ x_0^{(2)} \cdot (d-T) \cdot I_{0m} = r_{1m} \cdot \left[u_x \cdot J'_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_z \cdot a \cdot [1 - (-1)^n] + \omega \cdot a^2 \cdot [1 + (-1)^n]}{n \cdot \pi \cdot \text{sh} \frac{n \cdot \pi \cdot (d-T)}{2 \cdot a}} \cdot I'_{n0} - \omega \cdot J''_0 \right], \quad (21)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (x_n^{(3)} \cdot e^{K_n \cdot a} + y_n^{(3)} \cdot e^{-K_n \cdot a}) \cdot I_{nm} - \frac{1}{2} \cdot \left(x_m^{(2)} \cdot r_{4m} \cdot e^{\frac{m \cdot \pi \cdot a}{d-T}} + y_m^{(2)} \cdot r_{3m} \cdot e^{\frac{m \cdot \pi \cdot a}{d-T}} \right) = 0, \quad (22)$$

$$[\beta \cdot \text{ch}(K_m \cdot w) + K_m \cdot \text{sh}(K_m \cdot w)] \cdot y_m^{(4)} - \beta \cdot (x_m^{(3)} \cdot e^{K_m \cdot (a+b)} + y_m^{(3)} \cdot e^{-K_m \cdot (a+b)}) = 0, \quad (23)$$

$$\text{sh}(K_m \cdot w) \cdot y_m^{(4)} + x_m^{(3)} \cdot e^{K_m \cdot (a+b)} - y_m^{(3)} \cdot e^{-K_m \cdot (a+b)} = 0, \quad (24)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$,

$$r_{1m} = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases}, \quad r_{2m} = \begin{cases} -2 \cdot a, & m = 0 \\ 1, & m \neq 0 \end{cases}, \quad r_{3m} = \begin{cases} 2, & m = 0 \\ 1, & m \neq 0 \end{cases}, \quad r_{4m} = \begin{cases} 2 \cdot a, & m = 0 \\ 1, & m \neq 0 \end{cases}$$

$$J_n = |K_n| \cdot \int_{-d}^0 \cos^2 [K_n \cdot (z+d)] dz = \frac{|K_n| \cdot d}{2} \left(1 + \frac{\sin [2 \cdot K_n \cdot d]}{2 \cdot K_n \cdot d} \right),$$

$$J'_n = \int_{-T}^0 \cos [K_n \cdot (z+d)] dz = \frac{\sin [K_n \cdot d] - \sin [K_n \cdot (d-T)]}{K_n},$$

$$J''_n = \int_{-T}^0 z \cdot \cos [K_n \cdot (z+d)] dz = \frac{\sin [K_n \cdot (d-T)]}{K_n \cdot a} + \frac{\cos [K_n \cdot d] - \cos [K_n \cdot (d-T)]}{(K_n \cdot a)^2},$$

$$I_{mn} = \frac{1}{d-T} \cdot \int_{-d}^{-T} \cos \frac{m \cdot \pi \cdot (z+d)}{d-T} \cos [K_n \cdot (z+d)] dz = (-1)^m \cdot \frac{K_n \cdot (d-T) \cdot \sin [K_n \cdot (d-T)]}{[K_n \cdot (d-T)]^2 - (m \cdot \pi)^2},$$

$$I'_{mn} = \frac{1}{a} \cdot \int_{-d}^{-T} \operatorname{ch} \frac{m \cdot \pi \cdot (z+d)}{2 \cdot a} \cdot \cos [K_n \cdot (z+d)] dz = \frac{4}{(2 \cdot K_n \cdot a)^2 + (m \cdot \pi)^2} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot \pi \cdot \operatorname{sh} \frac{m \cdot \pi \cdot (d-T)}{2 \cdot a} \cdot \cos [K_n \cdot (d-T)] + K_n \cdot a \cdot \operatorname{ch} \frac{m \cdot \pi \cdot (d-T)}{2 \cdot a} \cdot \cos [K_n \cdot (d-T)] \right],$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

Система уравнений (18)–(24) построена относительно неизвестных $x_n^{(j)}$ и $y_n^{(j)}$, $j = 1, 2, 3, 4$. Система уравнений позволяет получить решения дифракционной задачи и гидродинамической задачи о колебаниях тела. Для определения неизвестных коэффициентов $A_n^{(j)}$ и $B_n^{(j)}$ необходимо в правых частях уравнений положить $u_x = u_z = \omega = 0$ и тогда $x_n^{(j)} = A_n^{(j)}$, $y_n^{(j)} = B_n^{(j)}$. Если же положить $A = 0$, то $x_n^{(j)} = C_n^{(j)}$, $y_n^{(j)} = D_n^{(j)}$. В случае, когда задано ненулевое значение амплитуды A и хотя бы одно из значений u_x , u_z , ω не равно нулю, система определяет потенциал Φ : $x_n^{(j)} = A_n^{(j)} + C_n^{(j)}$, $y_n^{(j)} = B_n^{(j)} + D_n^{(j)}$.

Система уравнений (18)–(24) является бесконечномерной. Для практического ее применения количество членов рядов ограничивалось сверху величиной $N < \infty$, то есть во всех соотношениях полагалось, что n и m принимали значения $0, 1, \dots, N$. Таким образом, поиск решений полученной системы осуществляется ее редукцией к конечной размерности N и, соответственно, заменой функциональных рядов для потенциалов скоростей в различных расчетных областях их частичными суммами N -го порядка.

После определения неизвестных коэффициентов $A_n^{(j)}$, $B_n^{(j)}$, $C_n^{(j)}$ и $D_n^{(j)}$ могут быть вычислены основные гидродинамические характеристики воздействия волны на судно, ошвартованное у причала.

Величина гидродинамического давления в произвольный момент времени t может быть определена как

$$p^{(j)}(x, z, t) = -\rho \cdot \frac{\partial \Phi^{(j)}}{\partial t} = -\rho \cdot \sigma \cdot i \cdot \Phi^{(j)}(x, z, t), \quad j = 1, 2 \quad (25)$$

Определив давление, испытываемое поверхностью судна, можем вычислить значения действующей на судно силы [19]:

$$X^{(j)}(t) = - \int_{-T}^0 [p^{(j)}(a, z, t) - p^{(j)}(-a, z, t)] dz, \quad (26)$$

$$Z^{(j)}(t) = - \int_{-a}^a p^{(j)}(x, -T, t) dx, \quad j = 1, 2. \quad (27)$$

Значения $X^{(1)}(t)$ и $Z^{(1)}(t)$ определяют нагрузку на судно, вызванную воздействием на него морских волн. Величины $X^{(2)}(t)$ и $Z^{(2)}(t)$ определяют гидродинамическую (инерционно-демпфирующую) силу, действующую на судно при его качке.

Значения $X^{(2)}(t)$ и $Z^{(2)}(t)$ связаны с присоединенными массами и коэффициентами сопротивления судна соотношениями [19]:

$$X^{(2)}(t) = - \left[\mu_{22} \cdot \frac{dU_x(t)}{dt} + \lambda_{22} \cdot U_x(t) \right], \quad (28)$$

$$Z^{(2)}(t) = - \left[\mu_{33} \cdot \frac{dU_z(t)}{dt} + \lambda_{33} \cdot U_z(t) \right], \quad (29)$$

где $U_x(t) = u_x \cdot e^{i\sigma t}$, $U_z(t) = u_z \cdot e^{i\sigma t}$, $X^{(2)}(t) = X^{(2)} \cdot e^{i\sigma t}$, $Z^{(2)}(t) = Z^{(2)} \cdot e^{i\sigma t}$, μ_{22} и μ_{33} – присоединенные массы качки судна; λ_{22} и λ_{33} – коэффициенты волнового сопротивления.

Из соотношений (28) и (29) легко вывести уравнения, разрешив которые, можно получить значения μ_{22} , λ_{22} , μ_{33} и λ_{33} .

$$X^{(2)} = -u_x \cdot [i \cdot \sigma \cdot \mu_{22} + \lambda_{22}], \quad (30)$$

$$Z^{(2)} = -u_z \cdot [i \cdot \sigma \cdot \mu_{33} + \lambda_{33}]. \quad (31)$$

После определения возмущающих и инерционно-демпфирующих сил по уравнениям движения судна могут быть определены его предельные перемещения, необходимые для расчета усилий в швартовых связях.

Численные результаты

Представленная математическая модель была использована для расчетов, выполненных с целью оценки границ влияния причала на испытываемые судном нагрузки. Ниже приведены примеры расчетов зависимостей горизонтальной составляющей силы, действующей на судно, от различных параметров задачи.

Для выполненных расчетов были приняты следующие значения параметров (кроме варьируемого).

- геометрия задачи: $a = 15$ м; $b = 5$ м; $d = 20$ м; $T = 4$ м; $b = 5$ м; $w = 5$ м;
- параметры пористой стенки: $b_w = 1,0$ м; $\varepsilon = 0,5$; $f = 2,0$; $C_m = 1,0$;
- количество членов ряда: $N = 25$.

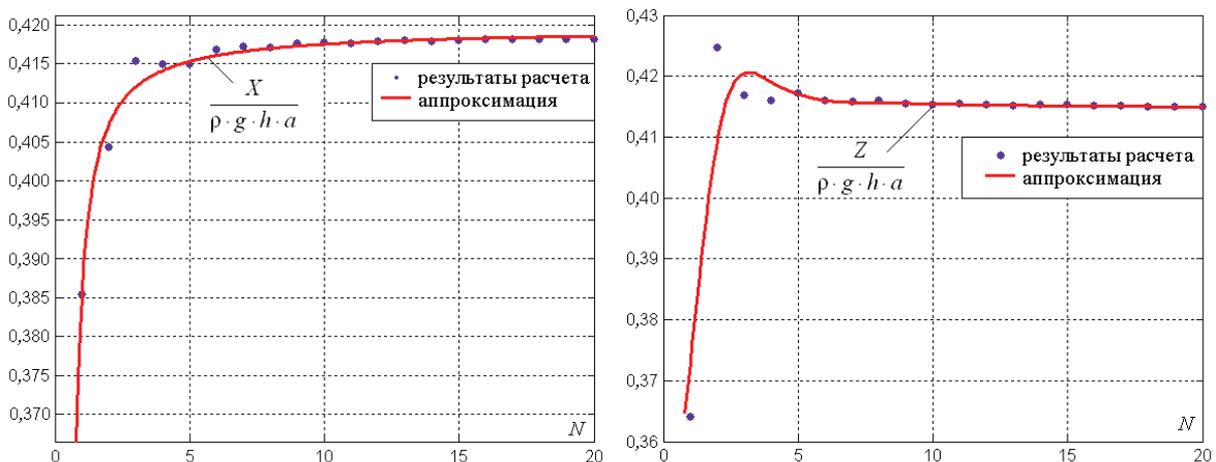


Рисунок 3. Зависимость значения составляющих X и Z возмущающей силы от числа N слагаемых в рядах

Рисунок 3 демонстрирует уточнение результата расчета с ростом числа членов рядов в представленных выше соотношениях для горизонтальной и вертикальной составляющих силового воздействия морских волн на судно. Видим, что уже при сравнительно небольших значениях N результат расчета перестает значительно изменяться. Приемлемыми являются значения $N \geq 5$. Таким образом, взятое значение $N = 25$ обеспечивает пренебрежимо малую погрешность от замены рядов с бесконечным числом слагаемых на их конечные суммы.

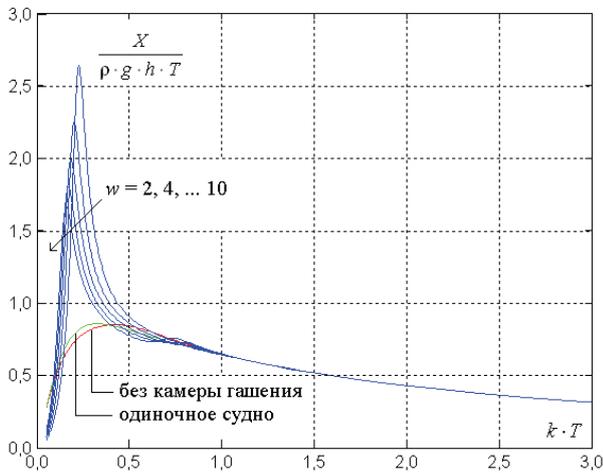


Рисунок 4. Зависимость горизонтальной составляющей возмущающей силы от ширины камеры гашения

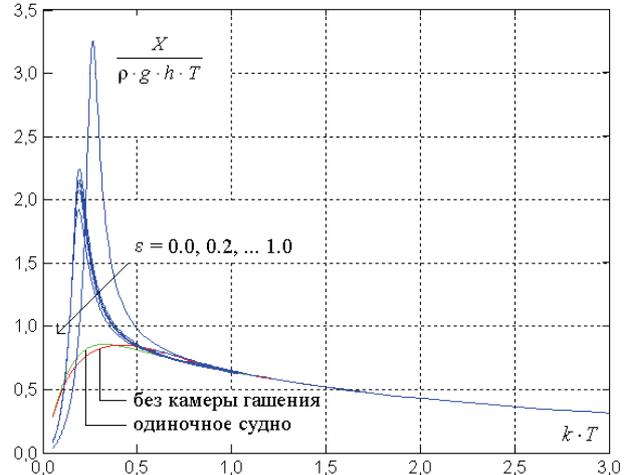


Рисунок 5. Зависимость горизонтальной составляющей возмущающей силы от пористости лицевой грани причала

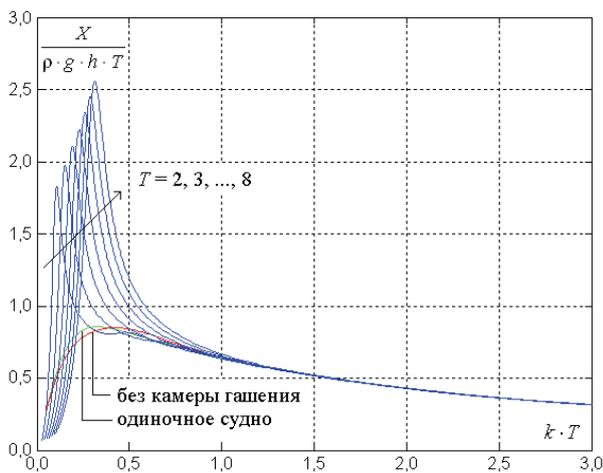


Рисунок 6. Зависимость горизонтальной составляющей возмущающей силы от осадки судна

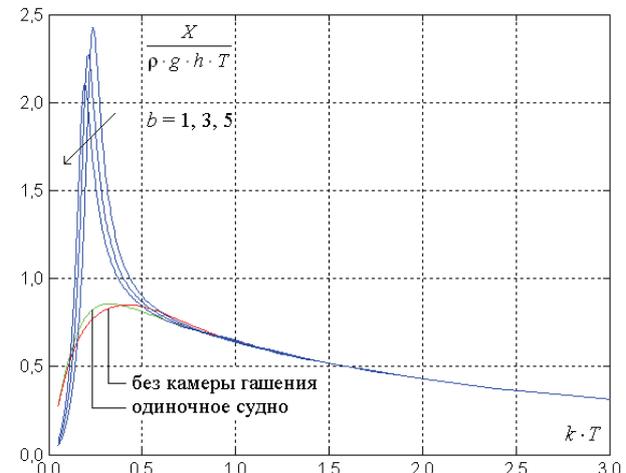


Рисунок 7. Зависимость горизонтальной составляющей возмущающей силы от расстояния между судном и лицевой гранью причала

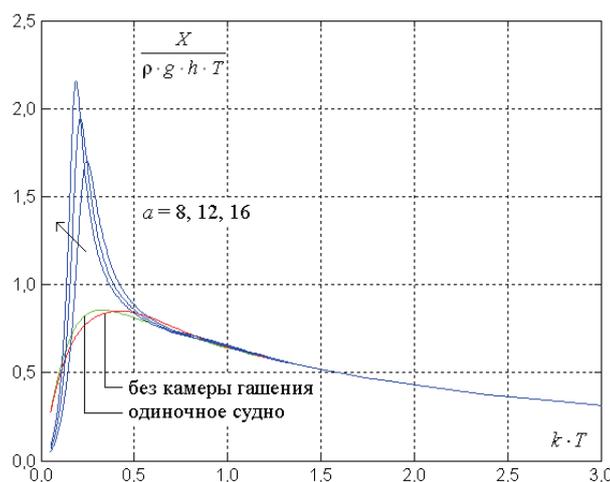


Рисунок 8. Зависимость горизонтальной составляющей возмущающей силы от полуширины судна

На рисунках 4–8 представлены зависимости амплитуды X горизонтальной составляющей силы, действующей на судно, от воздействия морских волн, от различных геометрических параметров задачи и характеристик причала в широком диапазоне значений волнового числа k . Для удобства сопоставления на рисунки нанесены также зависимости величины X от k для одиночно стоящего судна (в отсутствие причала) и в ситуации, когда причал представляет собой только пористую проницаемую вертикальную стенку (без камеры гашения за ней). Оба эти варианта предполагают, что берег бесконечно далеко удален от судна и стенки. Расчеты данных случаев велись в рамках математических моделей, представленных в работах [22–24].

Видим, что наличие камеры гашения существенно сказывается в диапазоне значений $k \cdot T$ от 0,1 до 0,5. Из зависимостей также видно влияние волногасящих свойств камеры. В случае, когда лицевая грань причала представляет собой непроницаемую вертикальную стенку (когда коэффициент пористости лицевой грани $\varepsilon = 0,0$), судно испытывает большие нагрузки (для приведенного примера – приблизительно в 1,5 раза). Видим, что правильный выбор проектных размеров причала позволяет уменьшить нагрузки, испытываемые судном.

Заключение

В работе представлена математическая модель, описывающая воздействие морских волн на судно, стоящее у причала с камерой гашения. Модель учитывает геометрические размеры камеры гашения и физические характеристики лицевой пористой стенки (коэффициенты сопротивления и пористости, присоединенную массу). Представленные соотношения позволяют выполнить расчет нагрузок (возмущающих сил) на судно и его гидродинамических характеристик (присоединенные массы и коэффициенты сопротивления). В качестве примера представлены результаты расчетов по приведенной модели.

Литература

1. Макаров К. Н. Математическое моделирование в морской гидротехнике. Сочи: Изд-во Сочинского государственного университета туризма и курортного дела, 2008. 397 с.
2. РД 31.33.03-88. Рекомендации по определению допустимых ветро-волновых условий при проектировании морских портов. М., 1989. 80 с.
3. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. User guide to physical modelling and experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011. 245 p.
4. Fonseca N., Guedes Soares C. Experimental Investigation of the Nonlinear Effects on the Vertical Motions and Loads of a Containership in Regular Waves // Journal of Ship Research. 2004. Vol. 48. No. 2. Pp. 118–147.
5. Faltinsen O. Sea loads on ships and offshore structures. Vol. 1. Cambridge: Cambridge university press, 1993. 332 p.

6. Linton C.M., McIver P. Handbook of Mathematical Techniques for Wave/Structure Interactions // Chapman & Hall / CRC, 2001. 624 p.
7. Zheng Y.H., Shen Y.M., Tang J. Radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long submerged rectangular structure parallel to a vertical wall // Ocean Engineering. 2007. No. 34. Pp. 69–82.
8. Chong W., Watanabe E., Utsunomiya T. An eigenfunction expansion-matching method for analyzing the wave-induced responses of an elastic floating plate // Applied Ocean Research. 1995. No. 17. Pp. 301–310.
9. Vasyuk S.M., Maximov V.V., Nudner I.S., Puchkov V.S. To the problem of calculation of pitch of buoyant object moored to stationary and floating berth // International Symposium on Ship Hydrodynamics (ISSH) devoted to 85th anniversary of birthday of Abram M. Basin, St. Petersburg, 1995. Pp. 238–244.
10. Prpić-Oršić J., Slapničar V., Turk A. Berth Operability Estimation Related to Ship Motion // Transactions of FAMENA. 2014. Vol. 38(1). Pp. 13–24.
11. Van Oortmerssen G. Forces related to motions of moored ships/analytical methods of moored ship motions // Advances in Berthing and Mooring of Ships and Offshore Structures. Springer, Netherlands. 1988. Pp. 265–281.
12. Ohkusu M. Ship motion in vicinity of a structure // Proceedings of the 1st International Conference on Behavior of Offshore Structures // The Norwegian Institute of Technology. 1974. Vol. 1. Pp. 284–306.
13. Lee Jaw-Fang. On the heave radiation of a rectangular structure // Ocean Engineering. 1995. Vol. 22(1). Pp. 19–34.
14. Hsu H.-H., Wu Y.-C. The hydrodynamic coefficients for an oscillating rectangular structure on a free surface with sidewall // Ocean Engineering. 1997. Vol. 24(2). Pp. 177–199.
15. Yang H.T.O., Huang L.H., Hwang W.S. The interference of a semi-submerged obstacle on the porous breakwater // Applied Ocean Research. 1997. No. 19. Pp. 263–273.
16. Hsu H.-H., Wu Y.-C. Scattering of water wave by a submerged horizontal plate and a submerged permeable breakwater // Ocean Engineering. 1999. No. 26. Pp. 325–341.
17. Ferreira M.D., Newman J.N. Diffraction effects and ship motions on an artificial seabed // Proceedings of the 24th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 19-22 April, Zelenogorsk, Russia. 2009. 216 p.
18. Sakakibara S., Kubo M. Effect of structure types of quay wall on moored ship motions // Coastal Engineering Journal. 2008. No. 50(1). Pp. 101–122.
19. Хаскинд М. Д. Гидродинамическая теория качки корабля. М.: Наука, 1973. 328 с.
20. Ньюмен Дж. Морская гидродинамика / Перевод с английского. Л.: Судостроение, 1985. 368 с.
21. Yu X. Diffraction of water waves by porous breakwaters // Journal of Waterway, Port and Coastal Ocean Engineering. 1995. Vol. 121(6). Pp. 275–282.
22. Леонтьев В.А., Нуднер И.С., Семенов К.К. Взаимодействие волн с плавающим телом, расположенным у пористой стенки // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2012. С. 204–207.
23. Леонтьев В.А., Нуднер И.С., Семенов К.К. Взаимодействие морских волн с судном, закрепленным у причала // Труды Международной конференции «Математические и информационные технологии, MIT-2013», Врнячка Баня, Сербия – Будва, Черногория. 2013. С. 386–396.
24. Shchemelinin L.G., Leontiev V.A., Nudner I.S., Semenov K.K. Berth influence on wave loads on the moored ship near it // Proceedings of the 25th (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2015, to be published.

*Константин Константинович Семенов, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)7320171; эл. почта: semenov.k.k@gmail.com*

*Виктор Александрович Леонтьев, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)7057292; эл. почта: leontiev.vict@yandex.ru*

*Игорь Сергеевич Нуднер, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)7528499; эл. почта: igor_nudner@mail.ru*

© Семенов К.К., Леонтьев В.А., Нуднер И.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.55.7

Sea wave impact on a ship moored at the berth with a stilling pool

K.K. Semenov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
+79117320171; e-mail: semenov.k.k@gmail.com

V.A. Leontiev

Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F.Ustinov, St. Petersburg, Russia
+79117057292; e-mail: leontiev.vict@yandex.ru

I.S. Nudner

Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F.Ustinov, St. Petersburg, Russia
+79117528499; e-mail: igor_nudner@mail.ru

Key words

berth, stilling pool, mooring of a ship, wave impact

Abstract

When designing berths and ship mooring systems near berths, it is necessary to protect ships from dangerous displacements. To make a well-reasoned choice, it is necessary to make estimates of the characteristics of sea wave impact on the ship (with respect to the steady-wave mode in the waters). The results of numeric calculations are better suited for engineering purposes.

This paper presents a mathematical model to estimate hydrodynamic characteristics of wave impact on the ship moored at the berth with a stilling pool. To derive this mathematical model, the analytical method using eigenfunction expansion was employed.

Also, the article shows the calculation data to demonstrate the influence of berth characteristics on loads experienced by the ship.

References

1. Makarov K.N. *Matematicheskoe modelirovani'e v morskoy gidrotehnike* [Mathematical modeling in marine hydrotechnics]. Sochi: Sochi State University of Tourism and Spa Industry, 2008. 397 p. (rus)
2. *RD 31.33.03-88. Rekomendacii po opredeleniu dopustimyh vetro-volnovykh usloviy pri proektirovanii morskikh portov* [Guide 31.33.03-88. Recommendations for determination of allowed conditions on winds and waves for harbors design]. Moscow, 1989. 80 p. (rus)
3. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. *User guide to physical modelling and experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011. 245 p.
4. Fonseca N., Guedes Soares C. Experimental Investigation of the Nonlinear Effects on the Vertical Motions and Loads of a Containership in Regular Waves. *Journal of Ship Research*. 2004. Vol. 48. No. 2. Pp. 118–147.
5. Faltinsen O. *Sea loads on ships and offshore structures*. Vol. 1. Cambridge: Cambridge university press, 1993. 332 p. 65
6. Linton C.M., McIver P. *Handbook of Mathematical Techniques for Wave/Structure Interactions*. Chapman & Hall / CRC, 2001. 624 p.
7. Zheng Y.H., Shen Y.M., Tang J. Radiation and diffraction of linear water waves by an infinitely long submerged rectangular structure parallel to a vertical wall. *Ocean Engineering*. 2007. No. 34. Pp. 69–82.
8. Chong W., Watanabe E., Utsunomiya T. An eigenfunction expansion-matching method for analyzing the wave-induced responses of an elastic floating plate. *Applied Ocean Research*. 1995. No. 17. Pp. 301–310.
9. Vasyuk S.M., Maximov V.V., Nudner I.S., Puchkov V.S. To the problem of calculation of pitch of buoyant object moored to stationary and floating berth. *International Symposium on Ship Hydrodynamics (ISSH) devoted to 85th anniversary of birthday of Abram M. Basin*, St. Petersburg, 1995. Pp. 238–244.
10. Prpić-Oršić J., Slapničar V., Turk A. Berth Operability Estimation Related to Ship Motion. *Transactions of FAMENA*. 2014. Vol. 38(1). Pp. 13–24.
11. Van Oortmerssen G. Forces related to motions of moored ships/analytical methods of moored ship motions. *Advances in Berthing and Mooring of Ships and Offshore Structures*. Springer, Netherlands. 1988. Pp. 265–281.

12. Ohkusu M. Ship motion in vicinity of a structure. *Proceedings of the 1st International Conference on Behavior of Offshore Structures*. The Norwegian Institute of Technology. 1974. Vol. 1. Pp. 284–306.
13. Lee Jaw-Fang. On the heave radiation of a rectangular structure. *Ocean Engineering*. 1995. Vol. 22(1). Pp. 19–34.
14. Hsu H.-H., Wu Y.-C. The hydrodynamic coefficients for an oscillating rectangular structure on a free surface with sidewall. *Ocean Engineering*. 1997. Vol. 24(2). Pp. 177–199.
15. Yang H.T.O., Huang L.H., Hwang W.S. The interference of a semi-submerged obstacle on the porous breakwater. *Applied Ocean Research*. 1997. No. 19. Pp. 263–273.
16. Hsu H.-H., Wu Y.-C. Scattering of water wave by a submerged horizontal plate and a submerged permeable breakwater. *Ocean Engineering*. 1999. No. 26. Pp. 325–341.
17. Ferreira M.D., Newman J.N. Diffraction effects and ship motions on an artificial seabed. *Proceedings of the 24th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 19-22 April, Zelenogorsk, Russia*. 2009. 216 p.
18. Sakakibara S., Kubo M. Effect of structure types of quay wall on moored ship motions. *Coastal Engineering Journal*. 2008. No. 50(1). Pp. 101–122.
19. Huskind M.D. *Gidrodinamicheskaya teoriya kachki korablya* [Hydrodynamic Theory of Ship Rolling]. Moscow: Nauka, 1973. 328 p. (rus)
20. Nyumen Dzh. *Morskaya gidrodinamika* [Marine Hydrodynamics / Translated from English]. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985. 368 p. (rus)
21. Yu X. Diffraction of water waves by porous breakwaters. *Journal of Waterway, Port and Coastal Ocean Engineering*. 1995. Vol. 121(6). Pp. 275–282.
22. Leontiev V. A., Nudner I. S., Semenov K. K. Vzaimodeystvie voln s plavaushim telom, raspolozhennym u poristoy stenki [Waves interaction with body near permeable wall]. *Trudy XI Vserossiyskoy konferencii "Prikladniye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki"* [Proceedings of XI All-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics"]. Saint-Petersburg: Nauka, 2012. Pp. 204–207. (rus)
23. Leontiev V. A., Nudner I. S., Semenov K. K. Vzaimodeystvie morskikh voln s sudnom, raskreplennym u prichala [Waves interaction with ship near berth]. *Trudy Mezdunarodnoy konferencii "Matematicheskiye i informacionniye tehnologii MIT-2013"* [Proceedings of International Conference "Mathematical and informational technologies, MIT-2013"]. Budva. 2013. Pp. 386-396.
24. Shchemelinin L. G., Leontiev V. A., Nudner I. S., Semenov K. K. Berth influence on wave loads on the moored ship near it. *Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference ISOPE-2015*, to be published.

Full text of this article in Russian: pp. 57–66