

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-39-46  
УДК 629.5.015.24:629.543

В.А. Коршунов<sup>1</sup>, М.А. Кутейников<sup>2</sup>, Р.С. Мудрик<sup>1</sup>, Д.А. Пономарев<sup>1</sup>, А.А. Родионов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup> ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ПРОЦЕДУР В ОЦЕНКЕ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК ТАНКЕРА С УЧЕТОМ СЛОШИНГА И СКОРОСТИ ХОДА

**Объект и цель научной работы.** В исследовании рассматриваются подходы для учета слошинга и наличия скорости хода судна и их влияние при определении откликов судна по внешним нагрузкам на корпус.

**Материалы и методы.** Применяется трехмерный панельный метод для решения гидродинамической задачи об обтекании судна потенциальной жидкостью на регулярном волнении. Для учета слошинга используется непосредственно моделирование внутренних танков, также с потенциальной жидкостью внутри. Учет скорости производится с помощью добавочного потенциала набегающего потока.

**Основные результаты.** Произведен сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) амплитуд качки и изгибающих моментов с учетом и без учета вносимых в механическую модель дополнительных факторов.

**Заключение.** В ходе работы решена задача о качке судна на регулярном волнении с учетом слошинга и скорости хода. Проведен анализ влияния на отклики рассматриваемой механической системы учета рассматриваемых факторов. Используемый панельный метод показывает гибкость по отношению к учету дополнительных факторов моделирования и является перспективным направлением для исследования нелинейных эффектов при качке на волнении.

**Ключевые слова:** потенциальная жидкость, проблема внешних сил, панельный метод, контейнеровоз, нефтеналивное судно, регулярное волнение, слошинг, скорость хода.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-39-46  
UDC 629.5.015.24:629.543

V.A. Korshunov<sup>1</sup>, M.A. Kuteinikov<sup>2</sup>, R.S. Mudrik<sup>1</sup>, D.A. Ponomarev<sup>1</sup>, A.A. Rodionov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> St. Petersburg State Marine University, St. Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russia

## APPLICATION OF NUMERICAL PROCEDURES FOR ASSESSMENT OF TANKER WAVE LOADS INCLUDING SLOSHING AND SHIP SPEED

**Object and purpose of research.** The investigation considers approaches for inclusion of sloshing and ship speed and discusses their influence on estimation of hull responses to external loads.

**Materials and methods.** The 3D panel method is used to solve a hydrodynamic problem of potential flow around ship hull in regular waves. The sloshing is included by direct modeling of inner tanks also containing potential fluid. The ship speed is taken into account by additional potential of inflow.

**Main results.** Analysis of response amplitude operators (RAO) and bending moments with and without additional factors introduced in the mechanical model.

*Для цитирования:* Коршунов В.А., Кутейников М.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Применение численных процедур в оценке волновых нагрузок танкера с учетом слошинга и скорости хода. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 39–46.

*For citations:* Korshunov V.A., Kuteinikov M.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Application of numerical procedures for assessment of tanker wave loads including sloshing and ship speed. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 39–46 (in Russian).

**Conclusion.** The problem of ship motions in regular waves taking into account sloshing and ship speed was solved in the work process. The influence on responses of the considered mechanical system for taking these factors into considerations is analysed. The applied panel method shows flexibility regarding additional factors of modeling and offers a prospect for further investigation of non-linear effects associated with ship motions in waves.

**Keywords:** potential fluid, problem external forces, panel method, containership, oil tanker, regular waves, ship speed.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

С развитием численных методов для нахождения напряженно-деформированного состояния конструкций корпуса судна встает вопрос о более точном определении внешних нагрузок. Точность решения второй проблемы строительной механики непосредственно зависит от точности решения первой проблемы. Поэтому необходимо применение современных численных процедур для решения задач о нахождении внешних силовых воздействий на корпус судна в процессе качки судна на волнении. Рассмотрение механической системы движения судна на волнении требует учета различных нелинейных факторов. Часть из них связана с наличием скорости хода у судна и наличием подвижного жидкого груза.

Методы потенциального обтекания, основанные на двумерном методе плоских сечений, широко используются для гидродинамических расчетов. Разработка таких методов началась около 60 лет назад [1]. Однако эти методы имеют ограничения для определенных диапазонов скорости движения, отношения длины волны к длине корабля и моделирования волн. Трехмерные панельные методы, основанные на распределенных гидродинамических источниках, не ограничиваются низкими числами Фруда и позволяют учитывать продольное растекание при рассмотрении качки судна. В настоящее время панельный метод широко применяется для данных целей [2].

В настоящей работе для рассмотрения учета влияния скорости хода и слошинга применяется трехмерный метод граничных элементов, реализованный в программном комплексе Ansys-AQWA [3].

## Методы вычисления

### Calculation methods

Используется общая постановка о колебаниях судна на регулярном волнении с учетом обтекания потенциальной жидкостью. Потенциал скорости  $\Phi$  представляется комплексной формой  $\varphi$ , и на него

накладываются граничные условия на корпусе судна и на свободной поверхности [4]:

$$\Phi(x, y, z, t) = a_w \varphi(x, y, z) e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

### Учет скорости хода

Если судно имеет поступательную скорость, в уравнения необходимо внести поправки. Пусть судно имеет скорость  $\vec{v} = (v_1, v_2, 0)$ , тогда координаты точек  $\vec{X}$  относительно неподвижной системы координат будут равны:

$$\vec{X} = \vec{v}t + \vec{x}, \quad (2)$$

где  $\vec{x}$  – координаты точек относительно движущейся вместе с судном системой отсчета.

Полный нестационарный потенциал жидкости в этом случае будет зависеть от кажущейся частоты  $\omega_e$ :

$$\Phi(\vec{X}, t) = a_w \varphi(\vec{x}) e^{-i\omega_e t}, \quad (3)$$

где  $\omega_e = \omega - k \cdot v \cdot \cos(\beta)$ ;  $k$  – волновое число набегающей волны;  $\beta$  – курсовой угол между скоростью движения судна и направлением распространения волны, а  $v = |\vec{v}|$ .

В движущейся системе отсчета удовлетворяется линейное уравнение свободной поверхности:

$$(-i\omega_e + \vec{v} \cdot \nabla)^2 \varphi + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0 \quad (4)$$

и условие на смоченной поверхности тела:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega_e n_k + v m_k, & k = 1 \dots 6 \\ -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n}, & k = 7 \end{cases}, \quad (5)$$

где

$$(m_1, m_2, m_3) = (0, 0, 0)$$

$$(m_4, m_5, m_6) = -\frac{1}{v} \vec{v} \times \vec{n}.$$

Основываясь на уравнении Бернулли, гидродинамическое давление будет вычисляться:

$$p = \rho [i\omega_e \varphi(\vec{x}) + \vec{v} \cdot \nabla \varphi(\vec{x})] e^{-i\omega_e t}. \quad (6)$$

## Учет слошинга

Колебания жидкости в частично заполненных внутренних резервуарах оказывают влияние на гидростатические и гидродинамические свойства судов. Для численного моделирования удобно принять локальную систему координат резервуара (ЛСКР). На рис. 1 показана ЛСКР, центр которой располагается в центре тяжести свободной поверхности жидкости в резервуаре, а оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  параллельны соответственно осям глобальной неподвижной системы координат.

В ЛСКР, аналогично корпусу в целом, выделяется шесть основных видов движения резервуара: три поступательных в направлении осей ЛСКР и три вращательных вокруг осей ЛСКР. Геометрия резервуара и корпуса судна моделируется в непосредственном виде, с последующей дискретизацией на панели.

Задача о слошинге решается в рамках теории линейного потенциала, т.е. жидкость является невязкой и несжимаемой, течение жидкости безвихревое, а амплитуды качки малы. В частотной области полный потенциал жидкости во внутреннем резервуаре в ЛСКР состоит из компонентов колебательного движения, обусловленных шестью основными движениями внутреннего резервуара как твердого тела:

$$\Phi(\vec{x}_t, t) = \Phi(\vec{x}_t, \omega) e^{-i\omega t} = \sum_{j=1}^6 x_{ij} \varphi_j(\vec{x}_t, \omega) e^{-i\omega t}, \quad (7)$$

где  $\omega$  – частота гармонического движения плавающего тела;  $\varphi_j(\vec{x}_t, \omega)$  – потенциал жидкости внутри резервуара, определяемый  $j$ -м движением резервуара с единичной амплитудой;  $x_{ij}$  – АЧХ  $j$ -го движения резервуара.

Потенциал жидкости в резервуаре подчиняется следующим уравнениям:

- в области жидкости  $\vec{x}_t \in \Omega_t$ ,

$$\Delta \varphi_j = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi_j = 0, \quad (8)$$

- на средней свободной поверхности жидкости в ЛСКР  $z_t = 0$

$$-v \varphi_j + \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = \begin{cases} 0, & (j \neq 3) \\ -i\omega, & (j = 3) \end{cases}, \quad (9)$$

где  $v = \omega^2/g$ .

В уравнении (11) средняя свободная поверхность жидкости жестко движется в вертикальном направлении с вертикальным движением резервуара. Следует отметить, что в ЛСКР основные движения резервуара (за исключением вертикального движения) не вызывают вертикального смещения центра тяжести свободной поверхности жидкости резервуара. На внутренней поверхности корпуса резервуара  $\vec{x}_t \in S_t$  граничное условие имеет вид:

$$\frac{\partial \varphi_t}{\partial n} = -i\omega n_j, \quad (10)$$

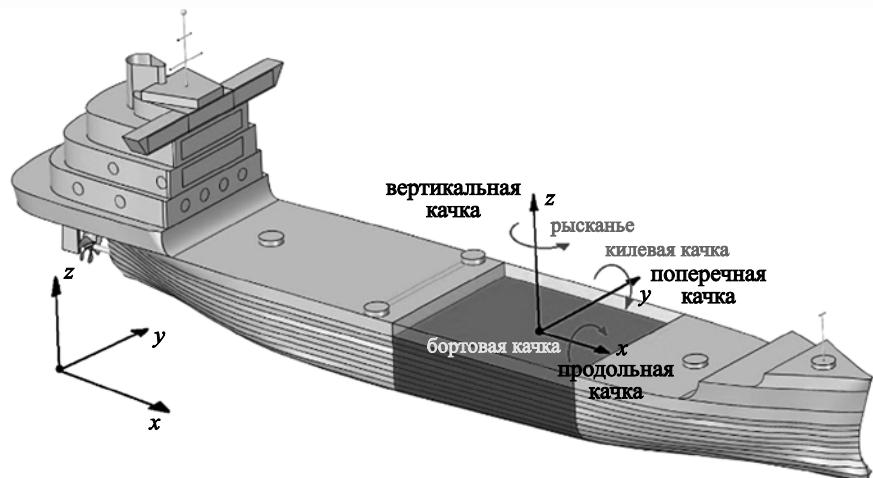
где

$$(n_1, n_2, n_3) = \vec{n}$$

$$(n_4, n_5, n_6) = \vec{x}_t \times \vec{n} \quad (j = 4..6).$$

В соответствии с уравнениями (8) и (10) потенциал колебательного движения жидкости из-за вертикального движения резервуара с единичной амплитудой будет равен:

$$\varphi_3 = -i\omega z. \quad (11)$$



**Рис. 1.** Локальная система координат резервуара и основные движения при качке

**Fig. 1.** Local coordinate systems of tank and main movements caused by ship motions

Видно, что вертикальная качка резервуара не вызывает деформации свободной поверхности жидкости; вместо этого свободная поверхность жестко движется вместе с резервуаром.

В отсутствие вязкости применение теории линейного потенциала для связанного гидродинамического анализа откликов может приводить к завышенным резонансным движениям жидкости в резервуаре. Чтобы преодолеть эту проблему, вводят упрощенный метод демпфирования [5], коэффициенты для которого подбираются из характеристик танка.

Для расчета потенциала жидкости во внутреннем резервуаре применяется метод источников, где используется функция Грина пульсирующего источника. Тогда потенциал  $\varphi_j$  представляется как:

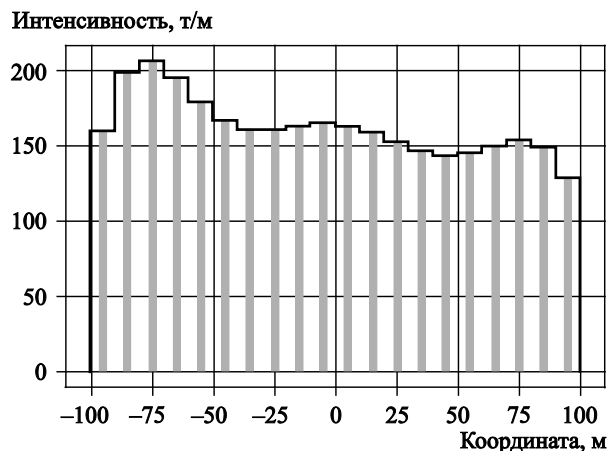
$$\varphi_j(\vec{x}_t, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_t} \sigma_j(\vec{\xi}_t, \omega) G(\vec{x}_t, \vec{\xi}_t, \omega) dS, \quad (12)$$

где  $\vec{x}_t \in S_t \cup \Omega_t$ ,  $\vec{\xi}_t \in S_t$  и  $j \neq 3$ .

Мощность источника  $\sigma_j(\vec{\xi}_t, \omega)$  по смоченной внутренней поверхности резервуара определяется из удовлетворения граничным условиям.

**Таблица 1.** Главные размерения контейнеровоза  
**Table 1.** Principal dimensions of containership

Длина $L$ , м	200,0
Ширина $B$ , м	29,8
Осадка $T$ , м	10,0
Положение центра тяжести от миделя $Xg$ , м	-5,48
Водоизмещение $D$ , тыс. т	32,42



**Рис. 2.** Нагрузка масс для контейнеровоза  
**Fig. 2.** Table of weights for containership

Гидродинамическое давление рассчитывается с использованием линеаризованного уравнения Бернулли:

$$p(\vec{x}_t, t) = -\rho_t \frac{\partial[\varphi(\vec{x}_t, \omega)e^{-i\omega t}]}{\partial t} = i\omega\rho_t\varphi(\vec{x}_t, \omega)e^{-i\omega t}. \quad (13)$$

Возникающая из-за слошинга  $j$ -я сила, вызванная движением резервуара с  $k$ -й единичной амплитудой относительно начала ЛСКР, будет равна:

$$F_{ijk} = -i\omega\rho_t \int_{S_t} \varphi_k n_j dS. \quad (14)$$

Уравнение 14 можно представить в виде:

$$\begin{aligned} F_{ijk} &= -i\omega\rho_t \int_{S_t} \{ \text{Re}(\varphi_k) + i \text{Im}(\varphi_k) \} n_j dS = \\ &= \omega\rho_t \int_{S_t} \text{Im}(\varphi_k) n_j dS - i\omega\rho_t \int_{S_t} \text{Re}(\varphi_k) n_j dS = \\ &= \omega^2 A_{ijk} + i\omega B_{ijk}, \end{aligned} \quad (15)$$

где присоединенные массы  $A_{ijk}$  и коэффициенты демпфирования  $B_{ijk}$  будут равны:

$$\begin{aligned} A_{ijk} &= \frac{\mu\rho_t}{\omega} \int_{S_t} \text{Im}(\varphi_k) n_j dS \\ B_{ijk} &= -\mu\rho_t \int_{S_t} \text{Re}(\varphi_k) n_j dS \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда матрицы присоединенной массы и матрицы демпфирования в локальной системе координат конструкции корпуса будут равны:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_g^t &= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{R} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{A}_t \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_g^t &= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{R} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{C}_t \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\mathbf{A}_t = [A_{ijk}]$ ,  $\mathbf{C}_t = [B_{ijk}]$  – матрицы присоединенной массы и коэффициентов демпфирования соответственно для основного движения резервуара в собственной системе координат.

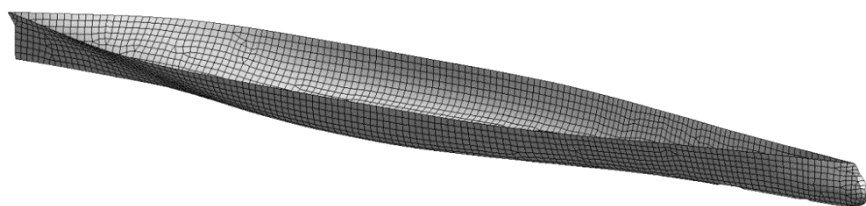
Данные матрицы дополняют основные матрицы системы качки судна.

## Описание расчетных моделей

### Description of calculation models

Для исследования скорости хода судна на отклики качки судна и силовых параметров выбрано судно-контейнеровоз длиной 200 м между перпендикулярами. Характеристики судна представлены в табл. 1, нагрузки масс показаны на рис. 2.

**Рис. 3.** Расчетная модель для смоченной поверхности рассматриваемого контейнеровоза



**Fig. 3.** Calculation model for wetted surface of the containership under consideration

Для проведения анализа качки и внешних нагрузок применяется программный продукт AQWA, реализующий панельный метод на основе функций Грина. Разработанная панельная модель содержит 3240 элементов, она представлена на рис. 3.

Расчеты параметров качки волновых нагрузок производились для углов набегания от  $180^\circ$  и  $150^\circ$ , частоты набегающего волнения брались в диапазоне от 0,1 до 2,0 рад/с с шагом 0,05 рад/с. Варьирование скорости производилось в диапазоне от 0 до 21 уз, при этом для расчетов взяты следующие значения скорости: 0 уз, 11 уз, 16 уз и 21 уз.

Оценка влияния перевозимого жидкого груза на параметры качки проводилась с помощью специализированной расчетной модели судна-танкера. Характеристики танкера представлены в табл. 2, нагрузки масс показаны на рис. 4.

В центральную часть расчетной модели была добавлена группа из трех одинаковых танков, симметрично расположенная относительно миделя. Танки имели форму параллелепипеда без переборок (рис. 5), со следующими параметрами: длина  $L_t = 28$  м; ширина  $B_t = 22$  м; высота  $H_t = 14$  м.

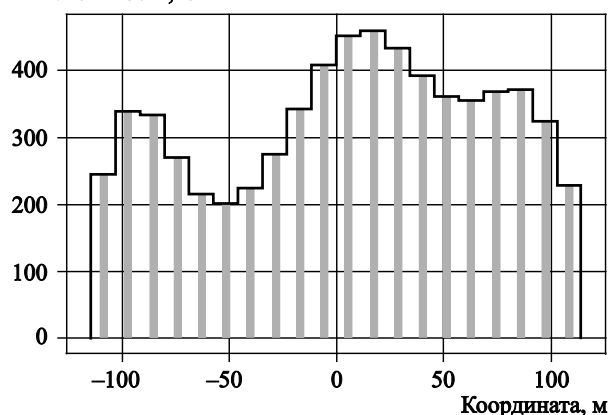
Рассматривалось четыре уровня заполнения танков – 100 %, 67 %, 50 %, 33 % – жидким грузом плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$ , что соответствует рекомендациям, содержащимся в Правилах [6]. Чтобы вы-

**Таблица 2.** Главные размерения танкера

**Table 2.** Principal dimensions of tanker

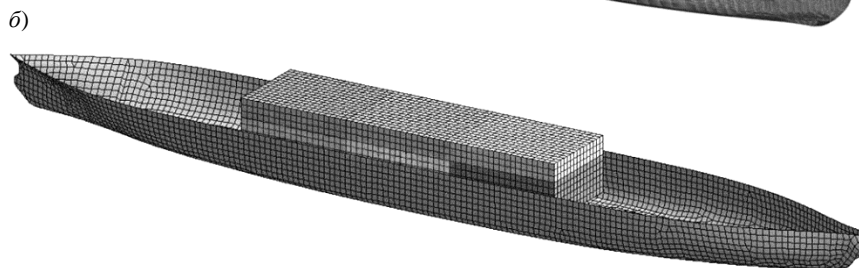
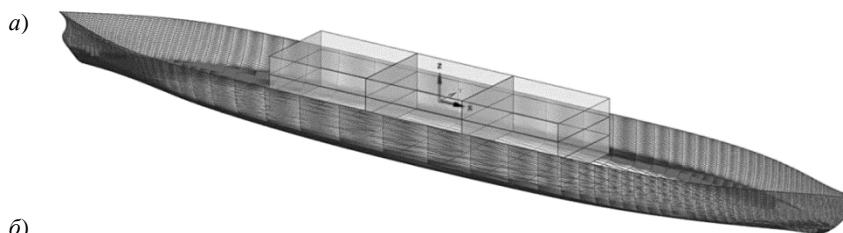
Длина $L$ , м	229
Ширина $B$ , м	32,24
Осадка $T$ , м	13,0
Положение центра тяжести от миделя $X_g$ , м	5,69
Водоизмещение $D$ , тыс. т	75,5

**Интенсивность, т/м**



**Рис. 4.** Нагрузка масс для танкера

**Fig. 4.** Table of weights for tanker



**Рис. 5.** Расчетные модели танкера для учета слошинга: а) геометрическая; б) панельная

**Fig. 5.** Calculation models for tanker to include sloshing: а) geometric model; б) panel model

явить влияние колебания жидкости в танках на параметры качки судна, расчеты для каждого уровня заполнения танков выполнялись в двух вариантах:

- с учетом колебаний жидкости в танках (с учетом слошинга);
- без учета колебаний жидкости в танках (без слошинга).

Жидкий груз в вариантах расчета без слошинга заменялся соответствующей нагрузкой масс. Расчетный анализ выполнен в частотной области.

## Анализ результатов

### Analysis of results

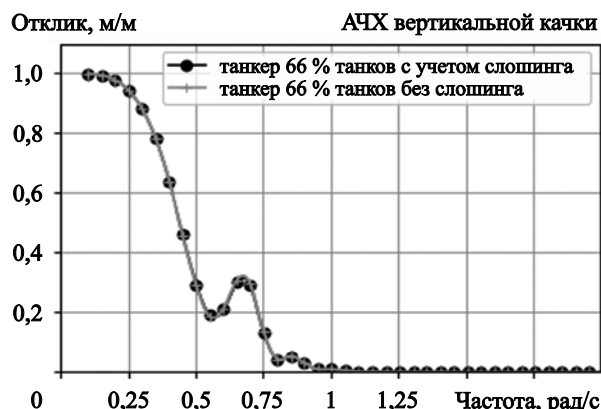
В результате решения набора задач с различными скоростями хода получены АЧХ видов качки (рис. 6, см. вклейку). Как для встречного, так и для косого волнения наблюдается появление резонанса на АЧХ вертикальной качки, при этом резонансная

амплитуда растет с увеличением скорости хода. Для килевой качки наблюдается смещение резонанса в сторону низких частот и увеличение резонансной амплитуды при увеличении скорости хода, но в отличие от вертикальной качки амплитуда практически не меняется при увеличении скорости больше чем на 11 уз, наоборот, наблюдается ее малый спад при переходе к 21 уз.

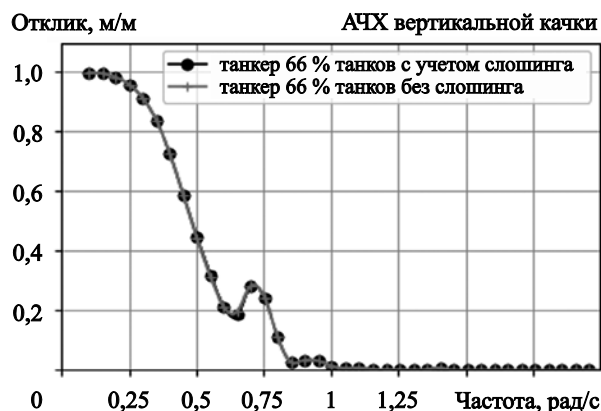
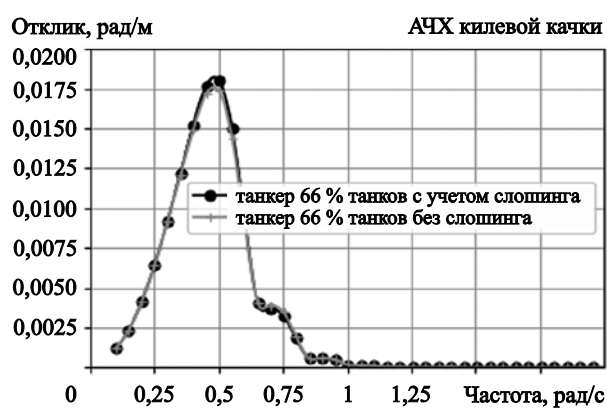
АЧХ волновых нагрузок показаны на рис. 7 (см. вклейку). Значения представлены в виде безразмерных коэффициентов сил моментов (18). Значения для моментов берутся в миделевом сечении, для сил – в сечении, находящемся на расстоянии четверти длины от миделя в нос.

$$k_{F_i} = \frac{F_i}{\rho g L B A}, \quad k_{M_i} = \frac{M_i}{\rho g L^2 B A}, \quad i \in \{x, y, z\}. \quad (18)$$

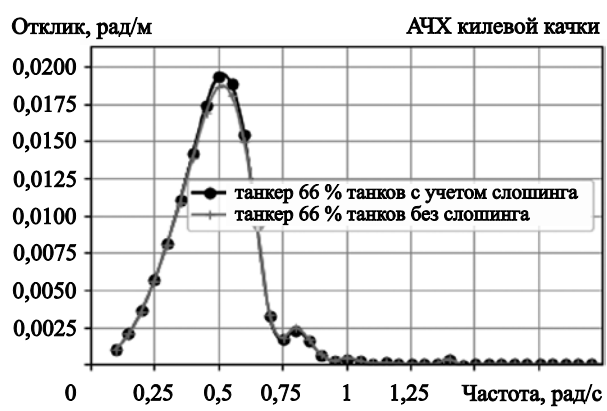
У вертикальной перерезывающей силы и вертикального изгибающего момента наблюдается сме-



a)



b)



**Рис. 10.** АЧХ параметров качки для танкера с учетом и без учета слошинга для загрузки танков на 66 %: а) на встречном волнении, угол набегания 180°; б) на косом волнении, угол набегания 150°

**Fig. 10.** RAO of tanker including and not including sloshing for tank filled 66 %: a) head seas, 180°; b) oblique seas, 150°

чение резонансных значений в сторону низких частот при увеличении скорости хода судна, при этом сами резонансные пики становятся острее и выше.

Ниже приведены фрагменты результатов расчета параметров качки для танкера при четырех уровнях заполнения танков и двух курсовых углах – 180° и 150°.

Эпюра гидродинамических (за вычетом гидростатики) давлений на стенки танка в виде реальной и мнимой составляющих, а также амплитудное поле давлений для частоты 0,6 рад/с при встречном волнении продемонстрирована на рис. 8 (см. вклейку).

АЧХ качки с учетом слошинга для рассматриваемых вариантов загрузки при встречном волнении и косом курсе показаны на рис. 9 (см. вклейку).

Учет жидкого груза обнаруживает заметное влияние степени загруженности танков для вертикальной и килевой качки. Величина пиков увеличивается по мере увеличения загрузки танков.

На рис. 10 представлены АЧХ видов качки с учетом и без учета слошинга для уровня заполнения танков 66 %.

Сравнительный анализ влияния слошинга как физического явления (при прочих равных) для различной степени загруженности показывает слабое влияние перетекания жидкости на параметры качки при данном волнении. Главным образом здесь это связано с продольными колебаниями жидкости при наличии поперечных переборок у танков, сильно ограничивающих их длину по отношению к длине судна, т.е. уменьшающих длину свободной поверхности жидкости.

## Заключение

### Conclusion

В работе продемонстрированы возможности методов численной гидродинамики по учету скорости хода судна и слошинга при рассмотрении задачи о качке судна на регулярном волнении. Проведен анализ влияния учета рассматриваемых факторов на отклики механической системы. Для этой цели на основе геометрических моделей контейнеровоза и танкера созданы численные модели для расчета панельным методом.

В результате серии расчетов получены АЧХ параметров качки и волновых нагрузок на корпус судна. Увеличение скорости хода ожидаемо дает смещение резонансной частоты в сторону низких частот. При этом при увеличении скорости амплитуды вертикальной качки увеличиваются. При уче-

те различной заполненности танков слошинг не вносит основную часть изменений в отклики системы, изменение откликов в основном связано с изменением массы самого жидкого груза.

Примененный метод дает реалистичные результаты для интересующих диапазонов частот. Панельный метод является достаточно гибким по отношению к учету дополнительных факторов моделирования, поэтому его целесообразно рассматривать как перспективное направление для исследования других эффектов, в т.ч. нелинейных, при качке на волнении.

## Список использованной литературы

### References

1. *Gerritsma J., Beukelman W.* Analysis of the modified strip theory for the calculation of ship motions and wave bending moments // *International Shipbuilding Progress*. 1967. Vol. 14, № 156. P. 319–337.
2. *Sun W., Ren H.L., Li H.* Numerical Solution for Ship with Forward Speed Based on Transient Green Function Method // *Journal of Ship Mechanics*. 2014. Vol. 18. P. 1444–1452.
3. *AQWA Users Manual : Rel. 15 / Ansys.* Canonsburg, 2013. VI, 108 p.
4. *Moczar B.O. et, Schellin T.E., Söding H.* Numerical Methods for Seakeeping Problems. Cham : Springer, [2021]. XII, 290, [1] p. DOI: 10.1007/978-3-030-62561-0.
5. *Malenica S., Zalar M., Chen X.B.* Dynamic coupling of seakeeping and sloshing // *Proceedings of the 13<sup>th</sup> international offshore and polar engineering conference (ISOPE 2003)*. [Cupertino, 2003]. P. 486–492.
6. Guide for “Safehull-dynamic loading approach” for vessels / *American Bureau of Shipping*. Spring, 2018. VIII, 80 p.

---

### Сведения об авторах

*Коришунов Владимир Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

*Кутейников Михаил Анатольевич*, д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Адрес: 191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 8. E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org.

*Мудрик Роман Сергеевич*, аспирант кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский

государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3. E-mail: mudrik.smk@gmail.com.

*Пономарев Дмитрий Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3. E-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru.

*Родионов Александр Александрович*, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

### **About the authors**

*Vladimir A. Korshunov*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st.,

St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

*Mikhail A. Kuteinikov*, Dr. Sci. (Eng.), Head of Hull and Ship Equipment Design Department, Maritime Register of Shipping. Address: 8, Dvortsovaya nab., St. Petersburg, Russia, post code 191186. E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org.

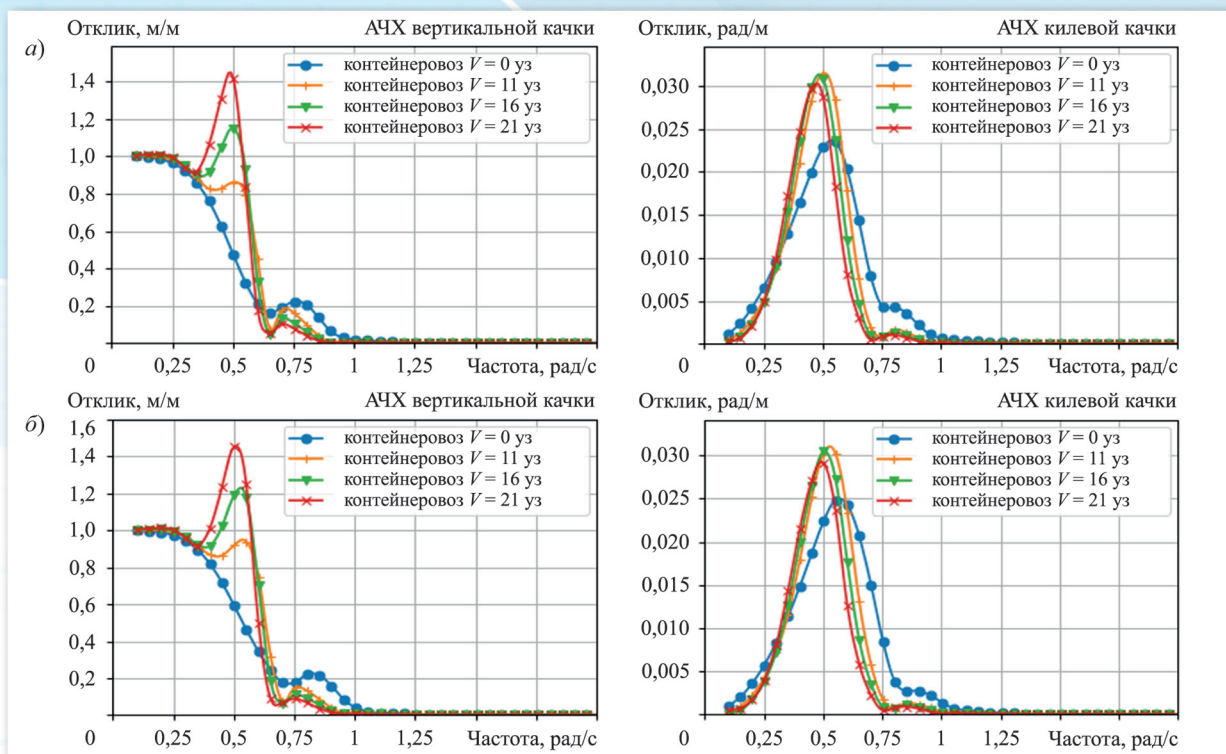
*Roman S. Mudrik*, Postgraduate Student, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: mudrik.smk@gmail.com.

*Dmitry A. Ponomarev*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru.

*Aleksandr A. Rodionov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

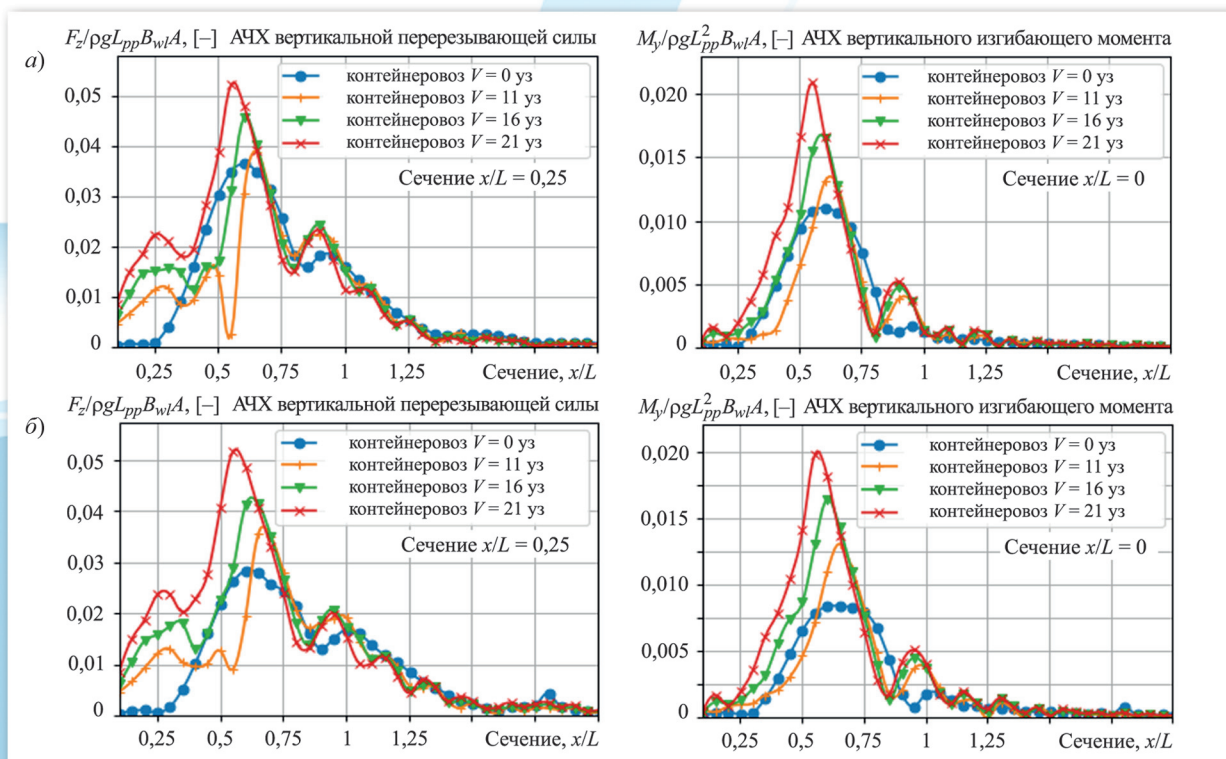
Поступила / Received: 18.02.22  
Принята в печать / Accepted: 29.06.22  
© Коллектив авторов, 2022





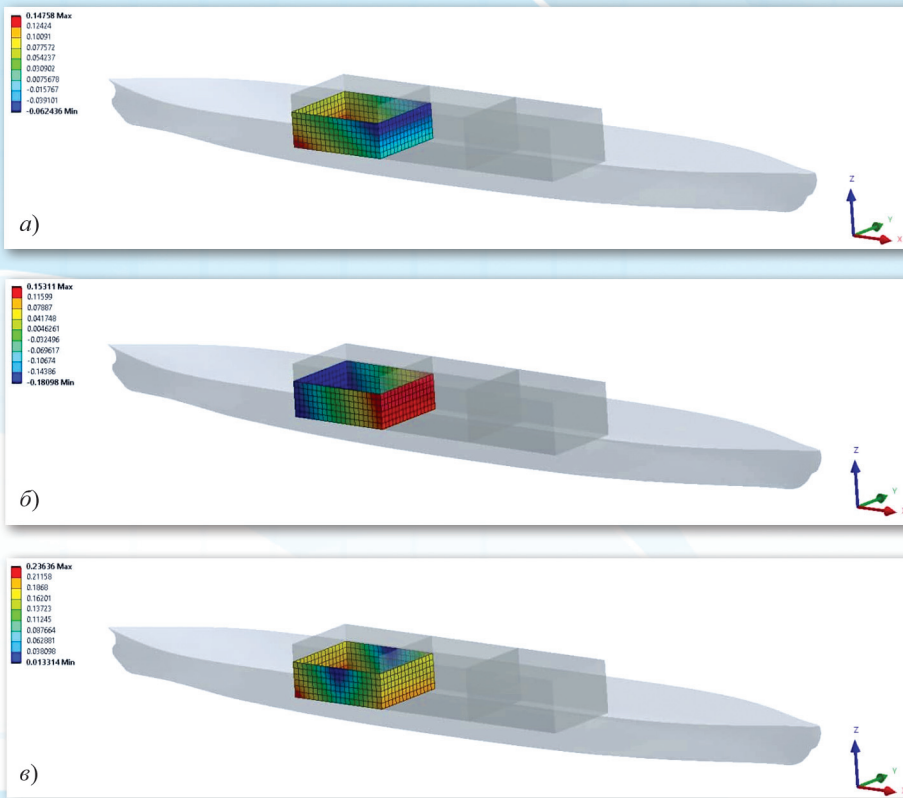
**Рис. 6.** Результаты расчета кинематических параметров качки контейнеровоза: а) на встречном волнении, угол набегания 180°; б) на косом волнении, угол набегания 150°

**Fig. 6.** Calculations of ship motion kinematic parameters for containership: a) head seas, 180°; b) oblique seas, 150°



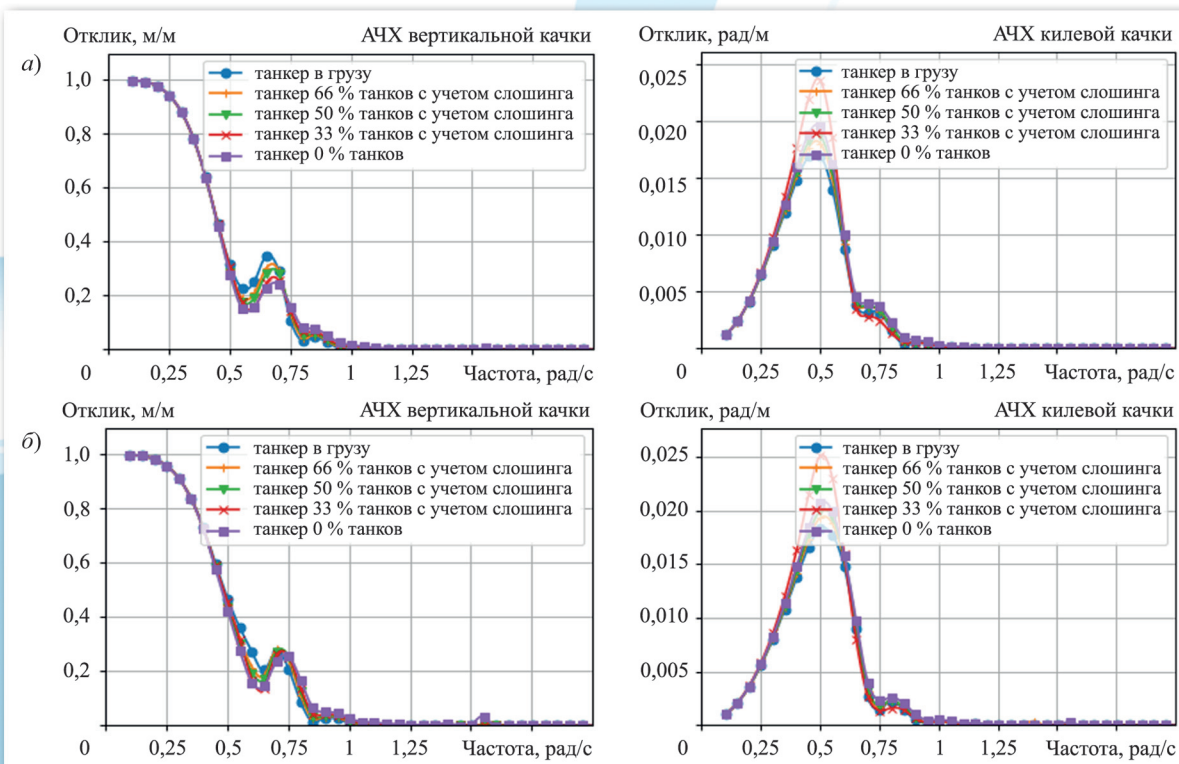
**Рис. 7.** Результаты расчета кинематических параметров качки контейнеровоза: а) на встречном волнении, угол набегания 180°; б) на косом волнении, угол набегания 150°

**Fig. 7.** Calculations of ship motion kinematic parameters for containership: a) head seas, 180°; b) oblique seas, 150°



**Рис. 8.** Поля гидродинамических давлений для частоты 0,6 рад/с при встречном волнении: а) реальная составляющая; б) мнимая составляющая; в) амплитудное поле

**Fig. 8.** Hydrodynamic pressure fields for frequency 0.6 rad/s in head seas: а) real component; б) imaginary component; в) amplitude field



**Рис. 9.** АЧХ параметров качки для танкера с учетом слошинга для загрузки танков на 100 % (танкер в грузу), 66 %, 50 % и 33 %: а) на встречном волнении, угол набегания 180°; б) на косом волнении, угол набегания 150°

**Fig. 9.** RAO of tanker including sloshing for tank filled 100 % (fully loaded condition), 66 %, 50 % and 33 %: а) head seas, 180°; б) oblique seas