

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-17-23  
УДК 629.5.015.4

В.А. Коршунов<sup>1</sup>, Р.С. Мудрик<sup>1</sup>, Д.А. Пономарев<sup>1</sup>, А.А. Родионов<sup>1</sup>, М.А. Кутейников<sup>2</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

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК КОРПУСА СУДНА

**Объект и цель научной работы.** В работе рассматривается решение задачи об определении интегральных внешних нагрузок на корпус судна различными способами, с последующим сравнением откликов системы.

**Материалы и методы.** Для определения внешних сил на регулярном волнении используются метод плоских сечений и панельный метод, основанный на методе граничных элементов.

**Основные результаты.** Приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) изгибающих моментов и перерезывающих сил для различных углов набегания волнения, полученные различными методиками. Проведен сопоставительный анализ расчетных схем.

**Заключение.** В ходе работы решена задача об определении внешних нагрузок на корпус судна и исследовано влияние численных гидродинамических методик. Результаты сравнения показывают практическую применимость обеих методик, при этом панельный метод имеет больше возможностей для ввода и учета нелинейных параметров.

**Ключевые слова:** потенциальная жидкость, проблема внешних сил, метод плоских сечений, панельный метод, нефтеналивное судно, регулярное волнение.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## NAVAL ARCHITECTURE

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-17-23  
UDC 629.5.015.4

V.A. Korshunov<sup>1</sup>, R.S. Mudrik<sup>1</sup>, D.A. Ponomarev<sup>1</sup>, A.A. Rodionov<sup>1</sup>, M.A. Kuteinikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russia

### COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS MODELS FOR PREDICTING WAVE LOADS ON SHIP HULL

**Object and purpose of research.** The study deals with the problem of defining the integral external loads on the ship hull by various methods with subsequent comparison of system responses.

**Materials and methods.** For determination of external forces in regular waves the strip method and panel method are used based on the boundary element technique.

**Main results.** Response amplitude operators (RAO) of bending moments and shearing forces for different wave headings obtained by various methods are compared. Calculation procedures are analyzed.

*Для цитирования:* Коршунов В.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А., Кутейников М.А. Сравнительный анализ различных моделей для прогнозирования волновых нагрузок корпуса судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 17–23.

*For citations:* Korshunov V.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A., Kuteinikov M.A. Comparative analysis of various models for predicting wave loads on ship hull. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 17–23 (in Russian).

**Conclusion.** The problem of defining the external forces on the ship hull was solved and numerical hydrodynamic procedures were analyzed in the work. Results show that both methods are practical, while the panel method provides a wider range of possibilities to input and include non-linear parameters.

**Keywords:** potential fluid, problem of external forces, strip method, panel method, oil tanker, regular waves.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

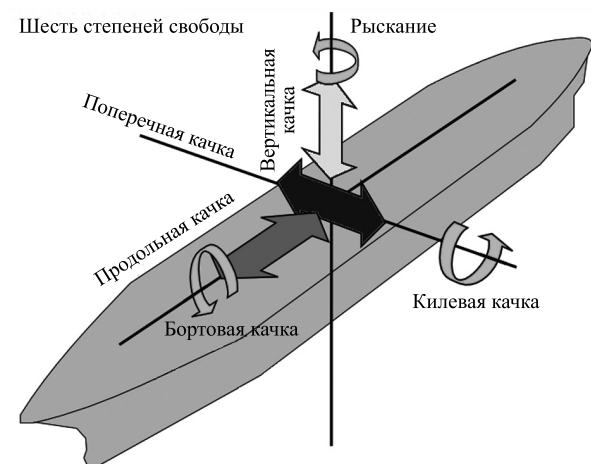
Повышение качества проектируемых судов непосредственно связано с совершенствованием методологии проектирования, сформулированной И.Г. Бубновым в форме трех проблем строительной механики: внешних воздействий, внутренних реакций и нормирования опасных состояний.

Современная реализация этой методологии опирается на широкое применение вычислительной техники, способной реализовывать высокоточные чис-

**Таблица 1.** Составляющие общего потенциала жидкости при качке

**Table 1.** Components of total potential in fluid

Потенциал набегающего (без учета влияния судна) волнения	$\varphi_0$
Потенциал дифрагированного (отраженного от неподвижного корпуса судна) волнения	$\varphi_7$
Потенциалы излучаемых (порожденных качкой судна) волнений, соответствующих колебаниям корпуса судна по шести степеням свободы (рис. 1)	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$



**Рис. 1.** Виды качки (степени свободы) судна

**Fig. 1.** Types of ship motions (degrees of freedom)

ленные математические модели. Наиболее успешно эти модели используются для решения проблемы внутренних реакций, в частности модели метода конечных элементов. В то же время для проблемы внешних воздействий уровень использования численных моделей значительно меньше, что не позволяет существенно повысить надежность результатов процесса проектирования. В работе исследуются возможности численных моделей оценки волновых нагрузок для последующего использования результатов расчета в анализе внутренних реакций корпуса.

К настоящему времени разработано множество численных методов для анализа мореходности судна на основе допущения о линейности процесса поведения судна на волнении [1, 2]. Ниже рассматриваются методы, основанные на потенциальной теории потока: метод плоских сечений и панельный метод. Первый реализован в программном продукте PDStrip [3, 4], второй – в программном продукте AQWA [5].

## Методы вычисления гидродинамических нагрузок

### Methods of calculating the hydrodynamic loads

В общей постановке задачи об обтекании корпуса судна на регулярном волнении потенциальной жидкостью потенциал скорости  $\Phi$  представляется комплексной формой  $\varphi$ , обезразмеренной по амплитуде набегающего волнения  $a_w$  [6]:

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

где  $\omega$  – частота волны.

По принципу суперпозиции потенциал представляется в виде суммы составляющих его потенциалов (табл. 1):

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) = \\ = \varphi_0(x, y, z) + \varphi_7(x, y, z) + \sum_{k=1}^6 U_k \varphi_k(x, y, z), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $U_k$  – комплексная амплитуда  $k$ -го вида качки.

Потенциалы  $\varphi_k = 0-7$  находят из решения отдельных краевых задач. Каждый потенциал должен удовлетворять уравнению Лапласа в области жидкости:

$$\Delta \varphi = 0, \quad k = 1-7 \quad (3)$$

при граничных условиях (табл. 2).

**Таблица 2.** Граничные условия связанной задачи для тела в потенциальной жидкости

**Table 2.** Boundary conditions for a body in potential fluid

Условия на свободной поверхности:	$-\omega^2 \varphi_k + g \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} = 0$ при $z = 0, k = 1-7$
Непротекание на смоченной поверхности, где $\vec{n} (n_1, n_2, n_3)$ – единичная нормаль к поверхности судна и $(n_4, n_5, n_6) = \vec{r} \times \vec{n}$ , $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из начала координат к точке на смоченной поверхности	$\frac{\partial \varphi_k}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_k, & k = 1-6 \\ -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n}, & k = 7 \end{cases}$
Непротекание на дне водоема, $d$ – глубина	$\frac{\partial \varphi_k}{\partial z} = 0$ при $z = -d, k = 1-7$
Затухание излучаемых волн на бесконечности	$\lim_{\sqrt{x^2+y^2} \rightarrow 0} \varphi_k = 0, k = 1-7$

При известном суммарном потенциале  $\varphi(x, y, z)$  распределение гидродинамического давления вычисляется с помощью линеаризованного закона Бернулли:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial t} = i\omega \rho \varphi(x, y, z) e^{-i\omega t}. \quad (4)$$

В результате интегрирования гидродинамического давления по смоченной поверхности корпуса вычисляются эпюры интегральных внешних нагрузок, действующих на судно.

## Метод плоских сечений

### Strip method

Данный подход представляет собой метод линейной суперпозиции. Поверхность корпуса судна идеализируется в виде серии призматических секций или сечений (рис. 2). Трехмерная задача разбивается на набор двумерных задач. Параметры колебаний на свободной поверхности каждого сечения находятся независимо от остальных, а характеристики колебаний судна получаются интегрированием по длине. Данный метод хорошо подходит для удлиненных тел, к которым относится большинство судов.

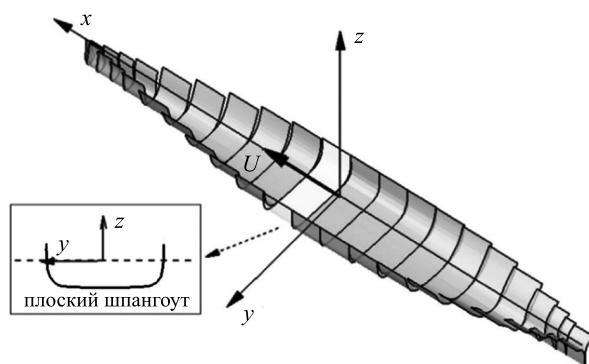
## Панельный метод

### Panel method

Описываемый подход является методом граничных элементов, используемым для решения задачи об обтекании судна потенциальной жидкостью в трехмерной постановке.

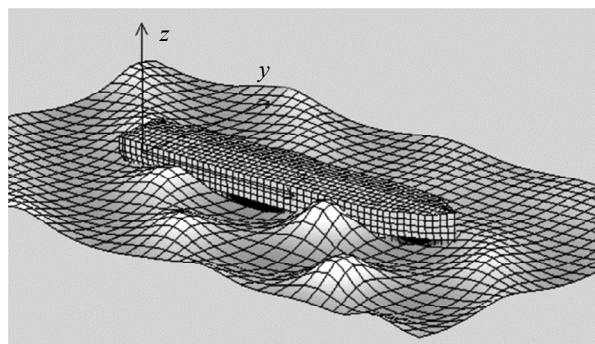
Поверхность корпуса судна и свободная поверхность дискретизируются элементами –

панелями (рис. 3), в центре которых располагаются потенциальные источники. Общая математическая формулировка задачи о нахождении потенциалов



**Рис. 2.** Идеализация подводной части корпуса судна в методе плоских сечений

**Fig. 2.** Simplified representation of underwater hull according to the strip method



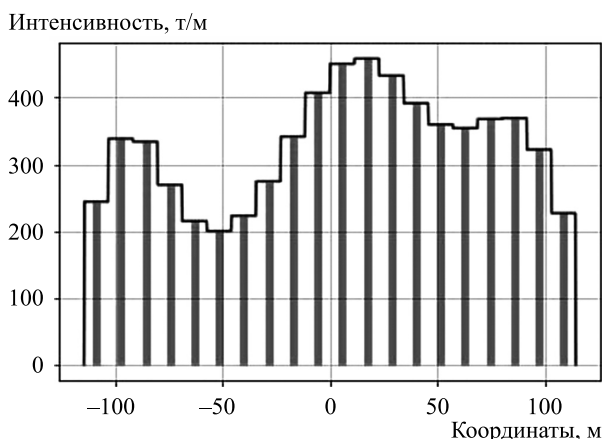
**Рис. 3.** Дискретизация корпуса судна и свободной поверхности в панельном методе

**Fig. 3** Discretization of ship hull and free surface according to the panel method

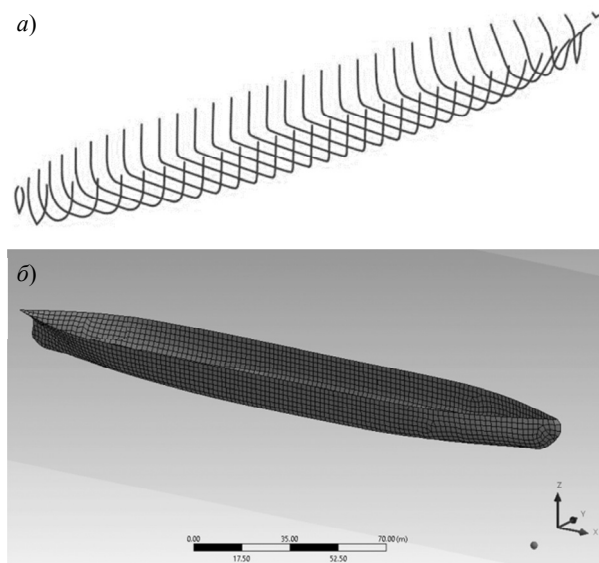
**Таблица 3.** Главные размерения исследуемого судна-танкера

**Table 3.** Principal dimensions of the oil tanker under study

Длина $L$ , м	229
Ширина $B$ , м	32,24
Осадка $T$ , м	13
Положение центра тяжести от миделя $X_g$ , м	5,68
Водоизмещение $D$ , тыс. т	75,3



**Рис. 4.** Нагрузка масс для танкера  
**Fig. 4.** Table of weights for the oil tanker



**Рис. 5.** Расчетные модели танкера для различных методов:  
 а) метод плоских сечений; б) панельный метод

**Fig. 5.** Oil tanker models for different methods:  
 а) strip method; б) panel method

жидкости (уравнение Фредгольма второго рода) сводится к методу коллокаций и поиску интенсивностей источников в каждой панели исходя из удовлетворения граничным условиям.

## Описание расчетных моделей

### Description of calculation models

Для сопоставления возможностей численных методов выполнен расчетный анализ параметров качки для нефтеналивного танкера. Основные размерения судна приведены в табл. 3, эпюра нагрузки масс показана на рис. 4.

В методе плоских сечений корпус танкера разбивался на 32 теоретические шпации, а в панельном методе смачиваемая поверхность танкера дискретизировалась 2954 панелями. Расчетные модели танкера для метода плоских сечений и панельного метода представлены на рис. 5.

Расчеты производились для случаев набега волнения от  $180^\circ$  и  $150^\circ$ , диапазон частот – от 0,1 рад/с до 2,0 рад/с с шагом 0,05.

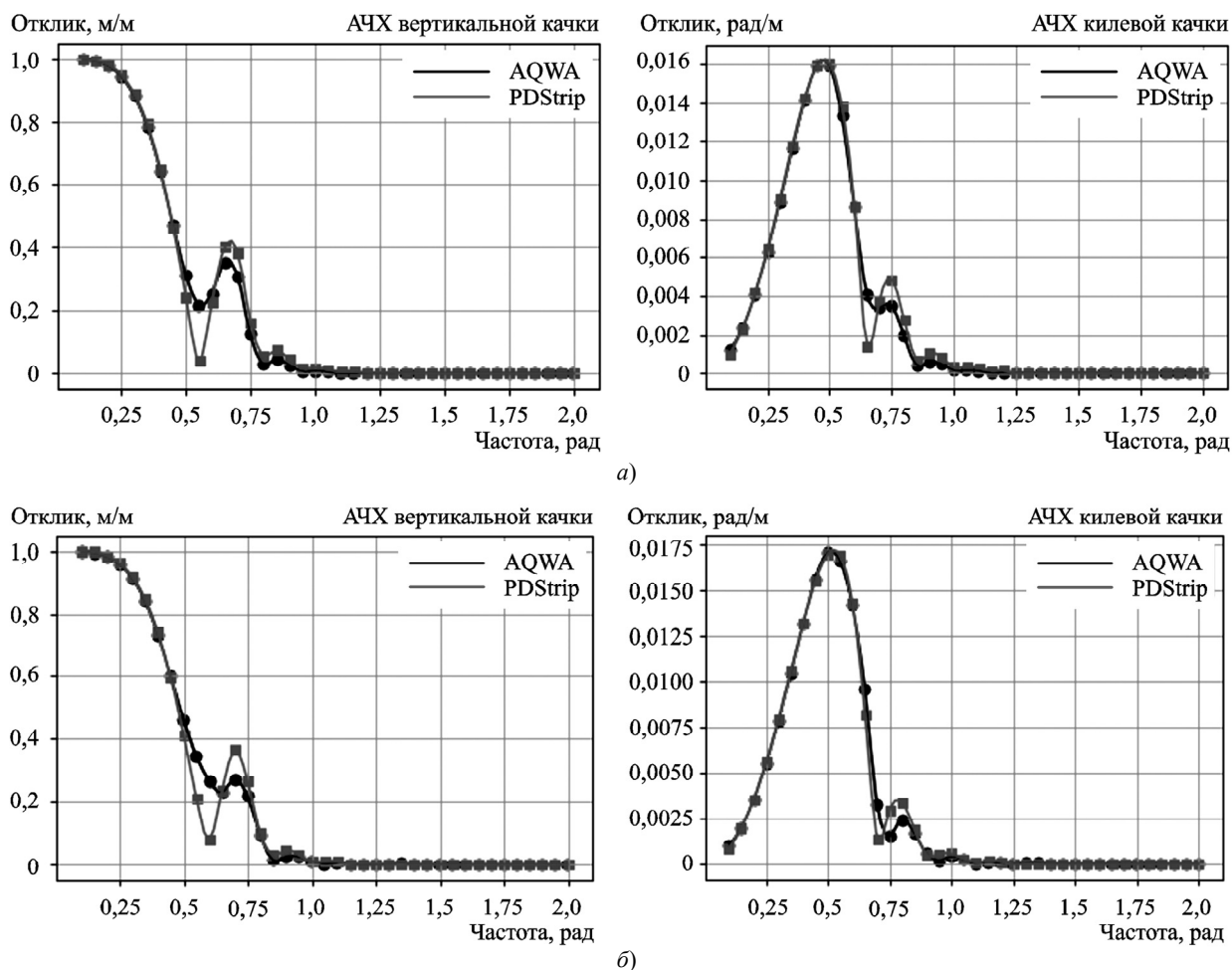
## Анализ результатов

### Analysis of results

Для танкера были выполнены расчеты качки судна с помощью программы PDStrip (метод плоских сечений) и AQWA (панельный метод). Результаты расчета обобщенных перемещений качки в форме амплитудно-частотных характеристик приведены на рис. 6 для различных курсовых углов. Перемещения представлены в безразмерной по отношению к полувысоте волны форме.

Вычислялись силовые отклики качки в виде перерезывающих сил, действующих в сечениях, отстоящих от миделевого сечения на величину  $x = 0,25L$ , и в виде изгибающих моментов, действующих в миделевом сечении  $x = 0$ . Все эти силовые отклики в форме амплитудно-частотных характеристик, отнесенных к полувысоте волны, показаны на рис. 7 для различных курсовых углов.

При прямом курсе ( $\beta = 180^\circ$ ) наблюдается достаточно хорошее совпадение кривых АЧХ параметров качки. При косом курсе ( $\beta = 150^\circ$ ) для вертикальной и бортовой качки имеет место небольшое расхождение результатов в диапазоне частот волнения 0,35–0,8 рад/с. Сравнение АЧХ волновых нагрузок в характерных сечениях корпуса при прямом и косом волнении показывает качественное и, в ряде случаев, количественное согласование кривых. Так, при прямом курсе заметное расхождение



**Рис. 6.** Результаты расчета кинематических параметров качки танкера в форме АЧХ с помощью метода плоских сечений PDStrip и панельного метода AQWA: а) на встречном волнении, угол набегания равен 180,0; б) на косом волнении, угол набегания равен 150,0

**Fig. 6.** Calculations of ship kinematic parameters in the form of RAO using the strip method PDStrip and the panel method AQWA: а) head waves; б) oblique waves

ние глобальных пиковых значений наблюдается для вертикальной перерезывающей силы и вертикального изгибающего момента. При этом превышение по методу плоских сечений составляет 12 % и 18 % для силы и момента соответственно.

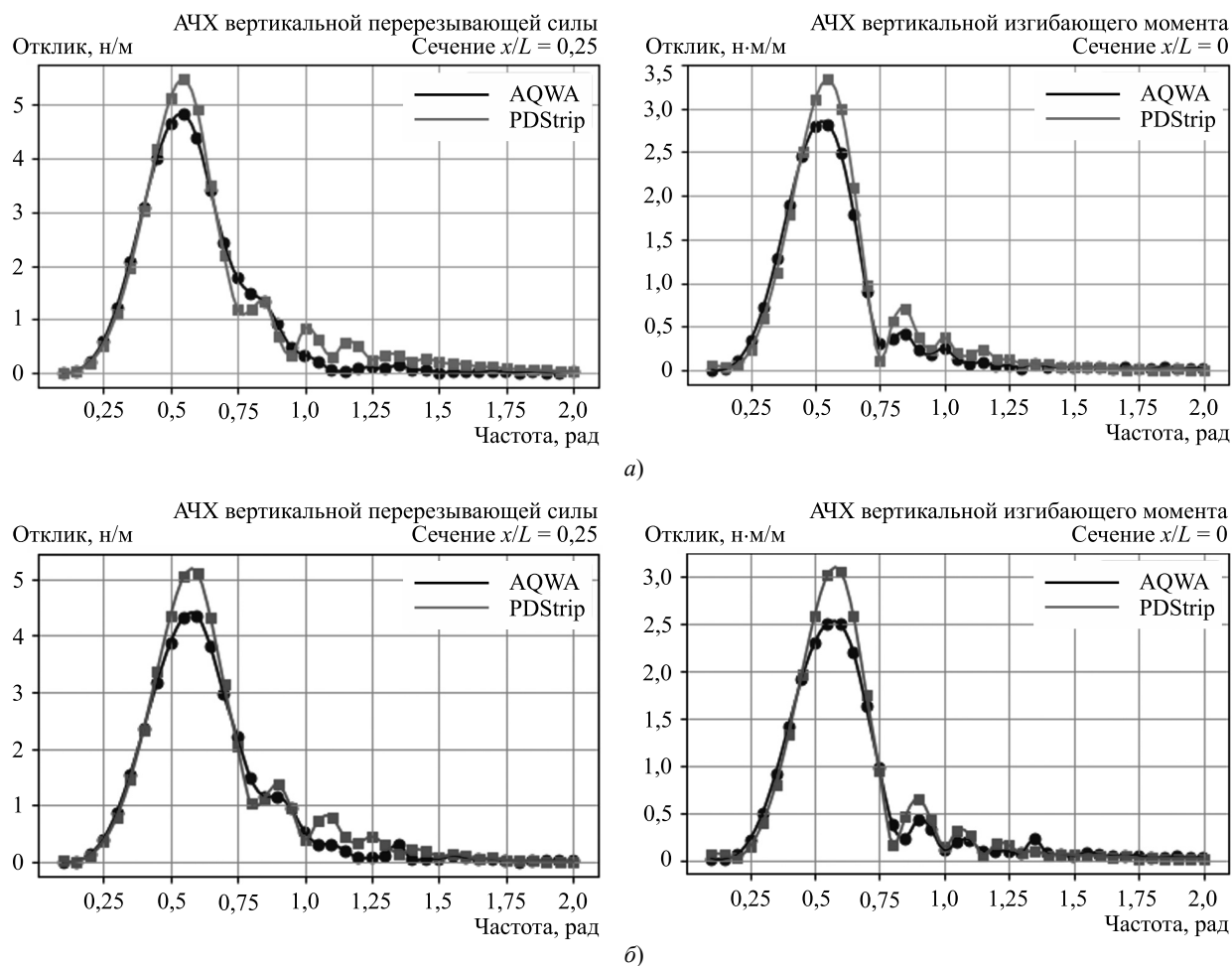
Таким образом, нельзя однозначно сказать, какой из численных методов дает верхнюю и нижнюю оценку волновых нагрузок. Можно отметить, что обе численные процедуры довольно близко определяют интегральные характеристики усилий (что следует из кривых АЧХ параметров качки), расхождения наблюдаются при вычислении функций распределения нагрузок по смоченной поверхности (что наблюдается на эпюрах нагрузки). Сле-

довательно, для расчета параметров качки пригодны обе численные процедуры, а для определения волновых нагрузок предпочтение стоит отдавать панельному методу, учитывающему трехмерность потока и реальные обводы корпуса.

## Заключение

### Conclusion

В работе проведен анализ поведения судна на регулярном волнении (параметры качки, нагрузки со стороны моря) с помощью методов расчета качки и численных методов гидродинамики с последующим сопоставлением результатов для различ-



**Рис. 7.** Результаты расчета силовых откликов качки танкера в форме АЧХ с помощью метода плоских сечений PDStrip и панельного метода AQWA: а) на встречном волнении, угол набегания равен 180,0; б) на косом волнении, угол набегания равен 150,0

**Fig. 7.** Calculation of force responses in the form of RAO using the strip method PDStrip and the panel method AQWA: а) head waves; б) oblique waves

ных сочетаний расчетных факторов (частота волнения, курсовые углы).

Разработаны расчетные модели танкера для метода плоских сечений и панельного метода. С помощью программных продуктов выполнены расчеты параметров качки, получены АЧХ видов качки и волновых нагрузок в характерных сечениях корпуса. Оба метода показали практическую применимость для вычисления силовых воздействий на корпус судна на волнении.

Панельный метод учитывает продольное растекание жидкости и позволяет более точно оценивать волновые нагрузки. И поскольку метод граничных элементов имеет больше возможностей для моди-

фикации по сравнению с методом плоских сечений, то его стоит оценивать как предпочтительный для дальнейшего изучения проблемы внешних сил, в т.ч. для учета нелинейных эффектов.

## Список использованной литературы References

1. Beck R.F. Time-domain computations for floating bodies // Applied ocean research. 1994. Vol. 16, № 5. P. 267–282.
2. Beck R.F., Reed A.M. Modern computational methods for ships in seaway // Transactions of Society of Naval and Marine Engineers. 2001. Vol. 109. P. 1–51.

3. *Söding H., Bertram V., Thiart G.* PDSTRIP : [hydrodynamic strip code] // SourceForge : [site]. San Diego, 2006–2015. URL: <https://sourceforge.net/projects/pdstrip/> (Accessed: 01/03/2022).
4. *Bertram V., Söding H., Graf K.* Program PDSTRIP: Public Domain Strip Method // ResearchGate : [site]. Berlin, [2009]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/262413711\\_Development\\_of\\_a\\_Freely\\_Available\\_Strip\\_Method\\_for\\_Seakeeping](https://www.researchgate.net/publication/262413711_Development_of_a_Freely_Available_Strip_Method_for_Seakeeping) (Accessed: 01.03.2022).
5. AQWA Users Manual : Rel. 15 / Ansys. Canonsburg, 2013. VI, 108 p.
6. *Newman J.N.* Marine Hydrodynamics. 40th Anniversary ed. Cambridge [et al.] : MIT Press, 2018. XIX, 426 p.

---

### Сведения об авторах

*Коршунов Владимир Александрович*, к.т.н., доцент кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

*Мудрик Роман Сергеевич*, аспирант кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская 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: 190008, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская 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: 190008, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: rodionovsmk@yandex.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.

### 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 190008. E-mail: korshunov@corp.smtu.ru.

*Roman S. Mudrik*, Postgraduate Student, Department of Ship Mechanics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008. 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 190008. 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 190008. E-mail: rodionovsmk@yandex.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.

Поступила / Received: 18.02.22  
Принята в печать / Accepted: 05.05.22  
© Коллектив авторов, 2022