

Таким образом при анализе полученной траектории можно сделать вывод, что в общем случае оптимальной траекторией будет являться траектория, близкая к ортодромической. Рассмотренный метод учёта процесса теплопередачи в задачах определения оптимальной траектории может быть использован, потому что появляется новый критерий оптимизации. Чем больше факторов оптимальности учитывается при планировании, тем более экономически выгодным может оказаться рейс в целом. То есть даже при небольшом выигрыше в каждом из отдельно учтённых критериев, суммарная выгода перехода может быть существенной. Так же метод дискретизации района плавания на ордереве с подграфами является важной частью расчёта, что более подробно будет рассмотрено в других работах. Также важным элементом работы данного алгоритма является методика получения гидрометеорологической информации. Данный алгоритм может быть применён совместно с автоматической системой гидрометеомониторинга, которая разрабатывается на базе университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. Данная система может полностью удовлетворить потребность пользователя в получении необходимой информации о погоде.

Литература

1. Горбатов В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика. – М.: Наука, 1999. – 544 с.
2. Лопухов В.В. Методика расчета затрат энергии при периодическом подогреве мазута в резервуарах / В.В. Лопухов // РНСЭ, 10-14 сентября 2001: Материалы стендовых докладов. — Казань: Казанский гос. энерг. университет, 2001. – 40-43.

3. Новиков Ф. А. Дискретная математика для программистов: учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – 384с.
4. Дурнев Ю.Н. / Планирование и мониторинг оптимального режима подогрева груза нефтепродуктов на танкерах. / Ю.Н. Дурнев, операционный суперинтендант, ОАО «Новороссийское морское пароходство». //Морской вестник - Санкт-Петербург. – 2013.– С 113-115.
5. Плохотников К. Э., Николенко В. Н. Теория вероятностей в пакете MATLAB: учебник для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 611с. + Папка с MATLAB-файлами (16 семинарских занятий, 196 файлов).

References

1. Gorbатов V. A. Fundamental'nye osnovy diskretnoy matematiki. Informatsionnaya matematika. M.: Nauka, 1999, 544 s.
2. Lopukhov V.V. Metodika rascheta zatrat energii pri periodicheskom podogreve mazuta v rezervuarakh / V.V. Lopukhov // RNSE, 10—14 sentyabrya 2001: Materialystendovykh dokladov. — Kazan': Kazanskiy gos. energ. universitet, 2001. —40—43.
3. Novikov F. A. Diskretnaya matematika dlya programmistov. Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd. — SPb.: Piter, 2009, 384s.
4. Durnev Yu.N. / Planirovaniye monitoring optimal'nogo rezhima podogreva gruzha nefteproduktov na tankerakh. / Yu.N. Durnev, operatsionnyy superintendant, OAO «Novorossiyskoe morskoe parokhodstvo». / Morskoy vestnik -Sankt-Peterburg – 2013. S 113-115.
5. Plohotnikov K. E., Nikolenko V. N. Teoriya veroyatnostey v pakete MATLAB. / Uchebnik dlya vuzov. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2014. – 611s. + Papka s MATLAB-faylami (16 seminar-skikh zanyatiy, 196 faylov).

УДК 629.5.017.2

DOI: 10.34046/aumsuomt91/9

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ТАНКЕР

*Ю. И. Юдин, доктор технических наук, профессор
В.В. Перевозов, капитан*

Для моделирования движения танкера при выполнении сложных маневров в реальных условиях плавания в его математическую модель требуется ввести математическое описание силовых нагрузок, определяющих характер влияния внешних факторов, присутствующих в районе маневрирования, на маневренные характеристики танкера. При маневрировании в условиях открытого моря в районе маневрирования присутствуют, как правило, все хорошо известные внешние факторы, включая волнение. В статье представлен способ математического моделирования силового воздействия нерегулярного волнения на танкер. Нерегулярное волнение имеет ряд особенностей, каждая из которых влияет на специфику его математического описания. Оно достаточно хорошо изучено с точки зрения его влияния на мореходные качества судна. Тем не менее, исследования в области судовождения требуют

несколько иного подхода в определении силовых нагрузок на корпус судна с целью определения влияния волнения на его маневренные характеристики.

Ключевые слова: маневрирование, танкер, волнение, силовые нагрузки, математическое моделирование

To simulate the movement of a tanker when performing complex maneuvers in real sailing conditions, it is necessary to introduce in its mathematical model a mathematical description of the power loads that determine the nature of the influence of external factors present in the maneuvering area on the maneuverability characteristics of the tanker. When maneuvering in open sea conditions, all well-known external factors, including waves, are usually present in the maneuvering area. The article presents a method of mathematical modeling of the force effect of irregular waves on a tanker. Irregular excitement has a number of features, each of which affects the specifics of its mathematical description. It is quite well studied in terms of its impact on the seaworthiness of the vessel. Nevertheless, research in the field of navigation requires a slightly different approach in determining the power loads on the ship's hull in order to determine the influence of waves on its maneuverability.

Keywords: maneuvering, tanker, waves, power loads, mathematical modeling

Введение.

Любой инновационный способ управления судном требует глубокой теоретической и практической проработки. Способ управления судном, предлагаемый авторами не является исключением.

Использование способа управления танкером по отклонениям двух его точек от заданной траектории движения, который предлагается авторами настоящей статьи требует проведения обстоятельных исследований для оценки возможности его применения в условиях открытого моря.

Выполнение любых сложных маневров в условиях открытого моря сопряжено с наличием в районе маневрирования всех внешних факторов, каждый из которых имеет определённую специфику влияния на маневренные характеристики танкера. Для того чтобы оценить степень влияния того или иного фактора на маневренные характеристики необходимо провести серию экспериментов по маневрированию танкера в условиях воздействия внешних факторов. Это могут быть натурные эксперименты, но они требуют больших материальных и финансовых затрат, что не может быть оправдано с экономической точки зрения. Менее затратным, но более эффективным способом исследования в данном случае следует признать способ математического моделирования с использованием математической модели судна при заданном внешнем воздействии, включая воздействие нерегулярного волнения.

Моделировании воздействия нерегулярного волнения предусматривает предварительное рассмотрение воздействие регулярного волнения на судно. Расчёт постоянных составляющих силового воздействия регулярного и характер его воздействия рассмотрен в статье [4]. В данной статье мы представляем способ моделирования воздействия на танкер нерегулярного волнения.

Спектральные характеристики морского волнения

Для определения параметров силового воздействия на танкер со стороны ветрового волнения необходимо учитывать, что реальное морское волнение имеет сложную структуру, параметры которой во временном и пространственном измерении носят нерегулярный характер. Не углубляясь в подробности причины этого явления, следует отметить, что морское волнение - это случайный процесс со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности, в нашем случае силовое воздействие волнения на танкер будет носить случайный характер из-за постоянного изменения во времени основных параметров волнения (высота волны, длина волны, период волны и др.). Указанный фактор должен быть учтён при проведении исследований, направленных на совершенствование способов и методов управления судном при выполнении сложных судовых ключевых операций в условиях открытого моря.

Изменения во времени усилий волнового воздействия на танкер представляют собой стационарные случайные процессы, описание которых базируется на спектральном методе исследования, т.е. реальное морское волнение представляется его спектральной плотностью, функцией, характеризующей распределение удельной энергии волн по частоте $S_{\zeta}(\omega_w)$. В практике научных исследований, связанных с определением усилий волнового воздействия чаще всего используются следующие аналитические формы представления спектров:

- спектр, состоящий из суммы высокочастотной $S_{\zeta_1}(\omega_w)$ и низкочастотной $S_{\zeta_2}(\omega_w)$ составляющих

$$S_{\zeta_1}(\omega_w) = 6.227 \times 10^{-2} \frac{H_{3\%}^2}{\bar{\omega}_w} \left(\frac{\bar{\omega}_w}{\omega_w} \right)^6 \exp \left[-0.52725 \left(\frac{\bar{\omega}_w}{\omega_w} \right)^4 \right] \quad (1)$$

$$S_{\zeta_2}(\omega_w) = 8.0312 \times 10^{-4} \frac{H_{3\%}^2}{\bar{\omega}_w} \left(\frac{\bar{\omega}_w}{\omega_w} \right)^8 \exp \left[-0.1688 \left(\frac{\bar{\omega}_w}{\omega_w} \right)^4 \right]$$

- спектр, предложенный Пирсоном и Московицем

$$S_{\zeta PM}(\omega_w) = 1.62 \times 10^{-2} \frac{g^2}{\omega_w^5} \exp \left[-0.74 \left(\frac{g}{\omega_w \bar{u}} \right)^4 \right] \quad (2)$$

- модифицированный спектр Неймана

$$S_{\zeta N}(\omega_w) = \frac{2.4\pi}{\omega_w^5} \exp \left[-\frac{4.575}{\omega_w^2 h_{3\%}^{0.8}} \right] \quad (3)$$

- спектр, рекомендованный 12-ой Международной конференцией опытовых бассейнов

$$S_{\zeta MC}(\omega) = 7.06\pi \frac{D_\zeta}{\omega_{wmax}} \left(\frac{\omega_{wmax}}{\omega_w} \right)^5 \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_{wmax}}{\omega_w} \right)^4 \right] \quad (4)$$

- спектр, разработанный А.И. Вознесенскими Ю.А. Нецветаевым [2]

$$S_{\zeta VN}(\omega_w) = \frac{9.43 D_\zeta}{\bar{\omega}_w} \left(\frac{\omega_{wmax}}{\omega_w} \right)^6 \exp \left[-1.5 \left(\frac{\omega_{wmax}}{\omega_w} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Так как в качестве основной характеристики волнения мы будем использовать высоту волны 3%-ой обеспеченности $h_{3\%}$, приведём вы-

ражения для определения средних значений характеристик волнения в функции от $h_{3\%}$:

$$\text{средняя частота } \bar{\omega}_w = 1.904 / \sqrt{h_{3\%}},$$

$$\text{максимальная частота } \omega_{wmax} = 0.71\bar{\omega}$$

$$\text{дисперсия волновых ординат } D_\zeta = 3.56 \times 10^{-3} h_{3\%}^2, \quad (6)$$

$$\text{средняя скорость ветра } \bar{u} = (h_{3\%} / 9.35 \times 10^{-3})^{0.4},$$

$$\text{средний период } \bar{\tau} = 3.1 / \sqrt{h_{3\%}},$$

$$\text{средняя высота } \bar{h} = 0.472 h_{3\%}.$$

Из приведенных выше формул для расчета энергетических спектров волнения выберем одну формулу, предварительно убедившись в их идентичности, представленных выражений с точки зрения решаемой нами задачи. Расчёты, выполненные для волнения с высотой волны $h_{3\%} = 5$ м по формулам (1)-(5), представленные в графической форме на рис.1, подтверждают наши предположения об их идентичности.

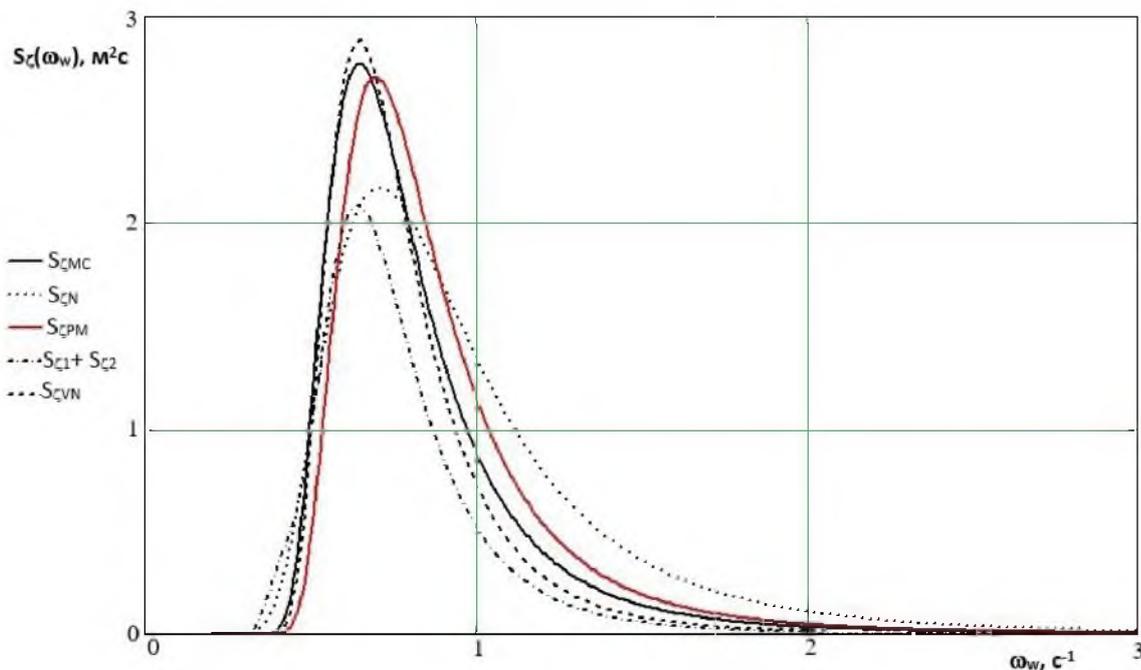


Рисунок 1 – Различные спектральные плотности нерегулярного волнения для $h_{3\%} = 5$ м

Учитывая это обстоятельство выберем для дальнейших исследований в качестве энергетического спектра волнения спектр, рекомендованный 12-ой Международной конференцией опытовых бассейнов, преобразовав его к виду удобному для числовой оценки влияния степени развитости волнения, в этом случае формула (4) примет вид

$$S_\zeta(\omega_w) = \frac{0.78}{\omega_w^5 K^4} \exp \left(-\frac{5.46}{h_{3\%}^2 \omega_w^4 K^4} \right) \quad (7)$$

K – коэффициент, зависящий от степени развитости волнения: развитому волнению соот-

ветствует $K = 1$, развивающемуся волнению ($K < 1$) $K = 0.6$, для мертвой зыби ($K > 1$) $K = 1.7$ [3].

На рис. 2 представлены в графической форме спектры волнения ($h_{3\%} = 5$ м) различной степени развитости, рассчитанные по формуле (7).

Используя спектральную плотность амплитуд нерегулярного волнения $S_\zeta(\omega_w)$, рассчитываемую по формуле (7), можно определить среднее значение и дисперсию любого его силового воздействия на танкер.

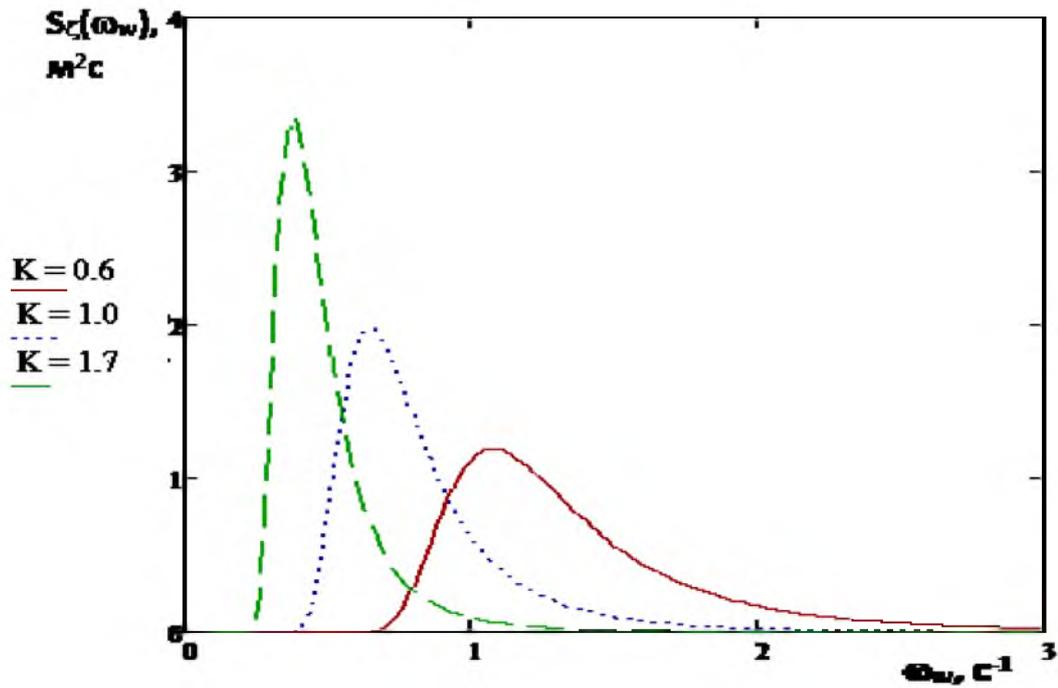


Рисунок 2 – Спектры нерегулярных волнений различной степени развитости при $h_{3\%} = 5$ м.

С учётом ограниченности объёма статьи, приведем расчёты для продольного усилия, имея в виду, что расчёты для поперечного усилия и вращающего момента имеют точно такую же структуру, так как они пропорциональны амплитуде волновой ординаты ζ_w . Поскольку все усилия линейно связаны с самим процессом волнения, что определено в работе [4], то для нерегулярного волнения можно рассчитать среднее значение и дисперсию продольного усилия по интегральным формулам:

$$\bar{X}_w = \int_0^{\infty} \frac{X_w}{\zeta_w} S_{\zeta}(\omega_w) d\omega_w \quad (8)$$

$$D_{X_w} = \int_0^{\infty} \left| \frac{\tilde{X}_w}{\zeta_w} \right|^2 S_{\zeta}(\omega_w) d\omega_w$$

здесь \tilde{X}_w - центрированное значение продольного усилия, т.е. разность между самым усилием X_w и его средним значением \bar{X}_w .

Применяя зависимости (8) для нахождения среднего значения продольного усилия на корпусе танкера со стороны волнения путем интегрирования, мы должны использовать выражения для усилий, представленные в виде функций длины волны λ , выразив её через частоту ω_w . В нашем случае уместно это сделать с учётом глубины акватории H , т.е.

$$\omega_w^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} th\left(\frac{2\pi}{\lambda} H\right) \quad (9)$$

В случае глубокой воды $th(2\pi H/\lambda) \cong 1.0$, поэтому для этого условия из выражения (9) получим:

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega_w^2} \quad (10)$$

Расчёт статистических характеристик волнового усилия и её момента

Ограничивая диапазон интегрирования с использованием выражений (8) по частоте в пределах $\omega_w = (0.1 - 1.5) \text{ с}^{-1}$ определяем средние значения амплитуды и среднее квадратическое отклонение (СКО) продольного усилия. Полученные результаты интегрирования представим в графическом виде на рис.3в виде функций курсового угла волны q_w при $h_{3\%} = 5$ м.

Как следует из рисунка 3 среднее значение амплитуды продольного усилия и её СКО очень похожи по характеру, кроме того СКО при всех заданных значениях курсового угла волны превышает среднее значение амплитуды продольного усилия. Это объясняется тем, что среднее значение продольного усилия имеют как положительные, так и отрицательные значения примерно в равных количествах, которые компенсируют друг друга при интегрировании. При вычислении дисперсии отклонения от среднего возводятся в квадрат в процессе интегрирования. Данные предположения можно подкрепить графически на конкретном примере. На рис. 4 показаны: амплитуда продольного усилия X_{wa} (в данном случае сохранено обозначение, введённое авторами в работе [4]) её среднее значение \bar{X}_w и центрированное значение ($X_{wa} - \bar{X}_w$) в зависимости от частоты волны ω_w . Вычисления выполнены для

курсового угла волны $q_w = 10^\circ$, высоты волны $h_{3\%} = 5$ м при развитом волнении ($K = 1$).

Из рис. 4 видно, что среднее значение продольного усилия относительно мало, так как его амплитудные значения имеют примерно равные интервалы с положительными и отрицательными знаками. В свою очередь это объясняет примерное равенство амплитудных значений продольного усилия и его центрированных значений.

Из рис. 4 видно, что среднее значение продольного усилия относительно мало, так как его амплитудные значения имеют примерно равные интервалы с положительными и отрицательными знаками. В свою очередь это объясняет примерное равенство амплитудных значений продольного усилия и его центрированных значений.

Этими расчетами исчерпывается учет эффекта влияния нерегулярного волнения на продольное усилие, действующее на танкер со стороны волнения. С помощью полученных результатов можно оценивать предельные значения рассматриваемого силового воздействия, так как они могут понадобиться при оценке возможностей движительно-рулевого комплекса танкера в исключительной ситуации, но они не представляют возможность генерировать значения составляющих волнового усилия и её момента, например, для целей моделирования перемещений объекта швартовки, к которому швартуется танкер.

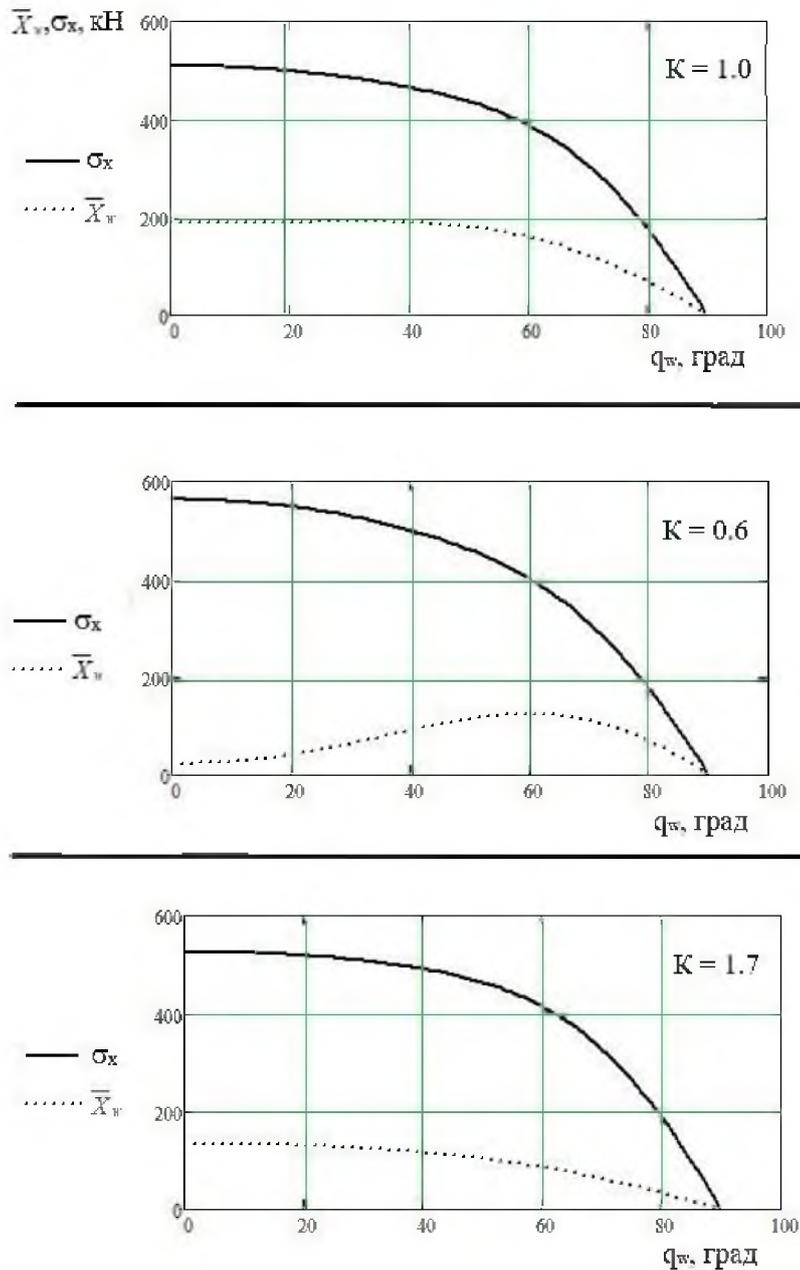


Рисунок 3 – Среднее значение амплитуды продольного усилия и её СКО (кН) для высоты волны $h_{3\%} = 5$ м и трех уровней развитости волнения $K = 1, 0.6, 1.7$ в зависимости от курсового угла волн q_w (одномерное волнение)

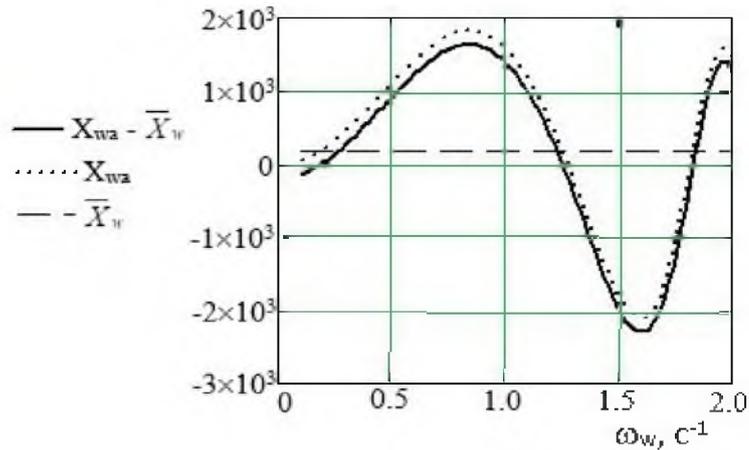


Рисунок 4 – Амплитуда продольного усилия, центрированное значение амплитуды и ее среднее значение (кН) в зависимости от частоты ω_w ($K = 1, q_w = 10^\circ, h_{3\%} = 5$ м)

В связи с этим, рассмотрим возможность генерации продольного усилия, используя найденные для него СКО и средние значения [5]. Фактически это легко сделать с помощью обычного канонического разложения случайного процесса $X_w(t)$ в ряд Фурье:

$$X_w(t) = \bar{X}_w + \sum_k \sigma_{xk} \cos(\omega_{wk}t + \varepsilon_{xk}) \quad (11)$$

Здесь k – номер гармоники случайного процесса $X_w(t)$; ω_{wk} – частота k -ой гармоники, σ_{xk} – СКО случайного процесса $X_w(t)$ на частоте ω_{wk} , ε_{xk} – фаза k -ой гармоники, являющаяся случайным числом при равномерном распределении на отрезке $0-2\pi$.

Для генерации процесса изменения продольного усилия возьмём частотный интервал от 0.45 до 1.5, который характерен для развитого нерегулярного волнения (см. Рис. 2) и с дискретностью $\Delta\omega_w = 0.05\text{c}^{-1}$ определим частоты k -ой гармоники, т.е. $\omega_{wk} = 0.45 + k \times \Delta\omega_w$, при этом $k = 0 \dots 22$. Для частот ω_{wk} рассчитаны значения СКО σ_k при конкретном значении степени развитости волнения $K = 1$, высоты волны $h_{3\%} = 5$ и курсового угла волны $q_w = 10^\circ$. Полученные значения σ_{wk} приведены в табл. 1.

Результаты генерации продольного усилия показаны на рис. 5. Генерация необходима при

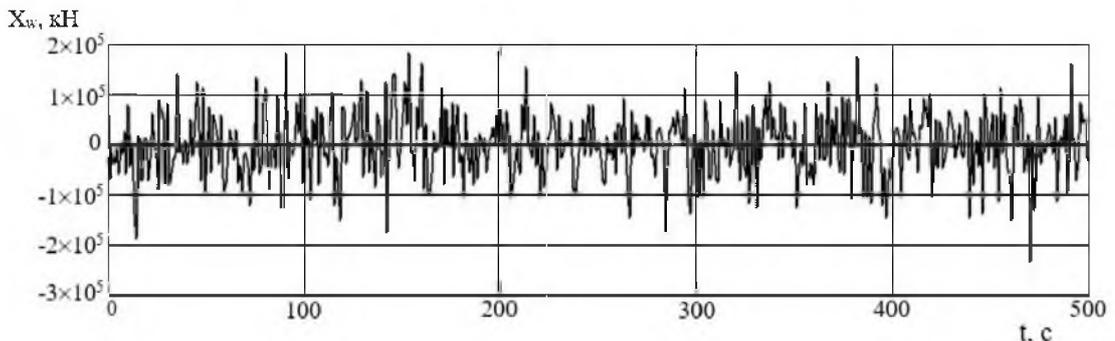


Рисунок 5-- Генерация продольного усилия, действующего на танкер в условиях нерегулярного волнения для $K = 1, h_{3\%} = 5$ м, $q_w = 10^\circ$

моделировании манёвров танкера в условиях нерегулярного морского волнения.

Таблица 1

k		σ_{wk}
0		71.401
1		9110
2		40897
3		682153
4		284021
5		787985
6		363712
7		922324
8		454431
9		189012
10		931347
11		615143
12		83809
13		13201
14		9113
15		46599
16		5012
17		97011
18		83149
19		39251
20		15111
21		54987

Не детализируя процедуру расчётов поперечного усилия и момента на корпусе танкера, приведём результаты их генерации в критических условиях воздействия нерегулярного волнения, т.е. курсовой угол волнения принят равным $q_w = 80^\circ$ (см. Рис. 6, 7)

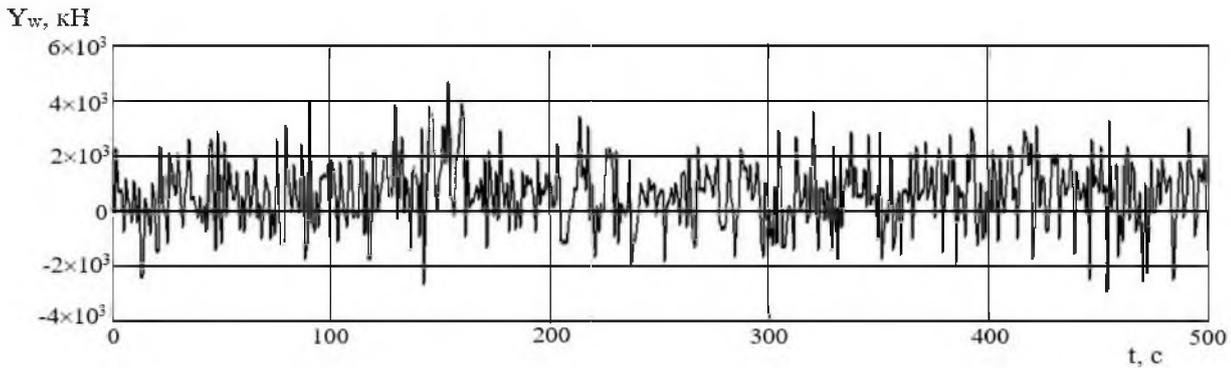


Рисунок 6 - Генерация поперечного усилия Y_w (кН) при действии нерегулярного волнения для $K = 1$, $h_{3\%} = 5$ м, $q_w = 80^\circ$

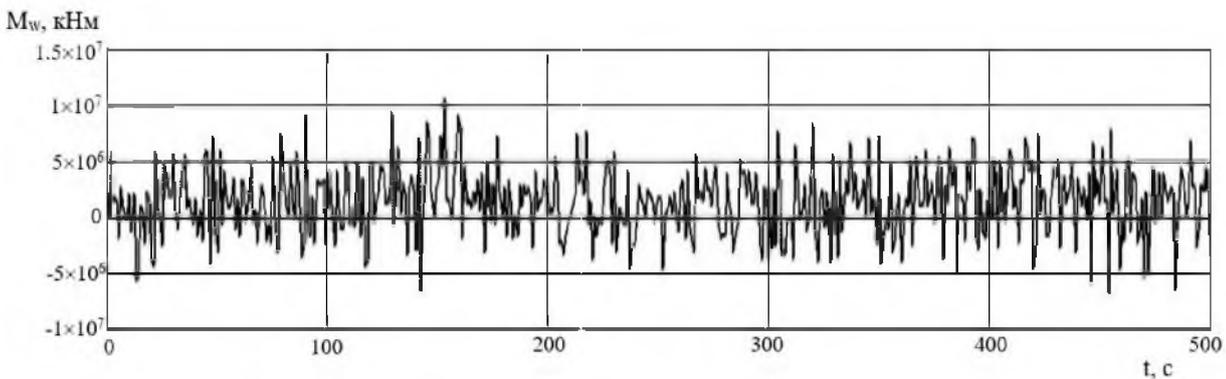


Рисунок 7 - Генерация момента M_w (кНм) при действии нерегулярного волнения для $K = 1$, $h_{3\%} = 5$ м, $q_w = 80^\circ$

Учёт глубины акватории

Место выполнения швартовой операции может оказаться в районе с малыми глубинами, поэтому при выполнении моделирования швартовки танкера необходимо учитывать ограниченность глубины. Прежде всего указанный фактор, как известно [1], влияет на спектр волнения, а, следовательно, и все силовые воздействия, определяемые им. Для того, чтобы учесть влияние мелководья используем поправку Китайгородского [6], [7] для мелководья

$$\Phi(\omega_w, H) = \left[\frac{k(\omega_w, \infty)}{k(\omega_w, H)} \right]^3 \frac{\partial k(\omega_w, H) / \partial \omega_w}{\partial k(\omega_w, \infty) / \partial \omega_w} \quad (12)$$

где $k(\omega_w, H) = (2\pi/\lambda)th(2\pi H/\lambda)$ - волновое число, соответствующее частоте ω_w на глубине H ;

$k(\omega_w, \infty)$ - волновое число, соответствующее частоте ω_w на глубокой воде.

После дифференцирования (12), выражение для поправки $\Phi(\omega_w, H)$ будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi(\omega_w, H) = th(\omega_w H/g) + (\omega_w^2 H/g) ch^{-2}(\omega_w H/g). \quad (13)$$

Спектральную модель можно представить в виде функции, учитывающей не только упомя-

нутые выше параметры волнения, но и глубину H в районе маневрирования танкера

$$S_\zeta(\omega_w, H) = \Phi(\omega_w, H) \times S_\zeta(\omega_w) \quad (14)$$

В первую очередь, это позволяет исследовать влияние фактора глубины акватории влияет на волнение разной степени развитости, т.е. с разными значениями K . На рис.8приведены два спектра: исходный спектр $S_\zeta(\omega_w)$ и спектр, редуцированный учётом глубины $S_\zeta(\omega_w, H)$, для трёх степеней развитости волнения: развитого волнения ($K=1$), развивающегося волнения ($K = 0.6$) и затухающего волнения (мертвой зыби) ($K = 1.7$).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы: – конечная глубина акватории несущественно изменяет вид спектра волнения;

- максимум спектра на малых глубинах остается практически таким же, как и на глубокой воде;
- изменяется суммарная мощность волнения, что особенно характерно для развитого и затухающего волнения;
- для развивающегося и развитого волнения мощность увеличивается, для затухающего – уменьшается.

Изменения в спектрах волнения на мелководье неизбежно приводит к изменениям в характере силового воздействия на танкер. На рис. 9 приведены средние значения продольного усилия на корпусе

танкера и его СКО для трёх степеней развитости волнения $K = 1, 0.6, 1.7$ на глубине $H = 20$ м. Для сравнения, здесь же показаны аналогичные статистические характеристики для глубокой воды.

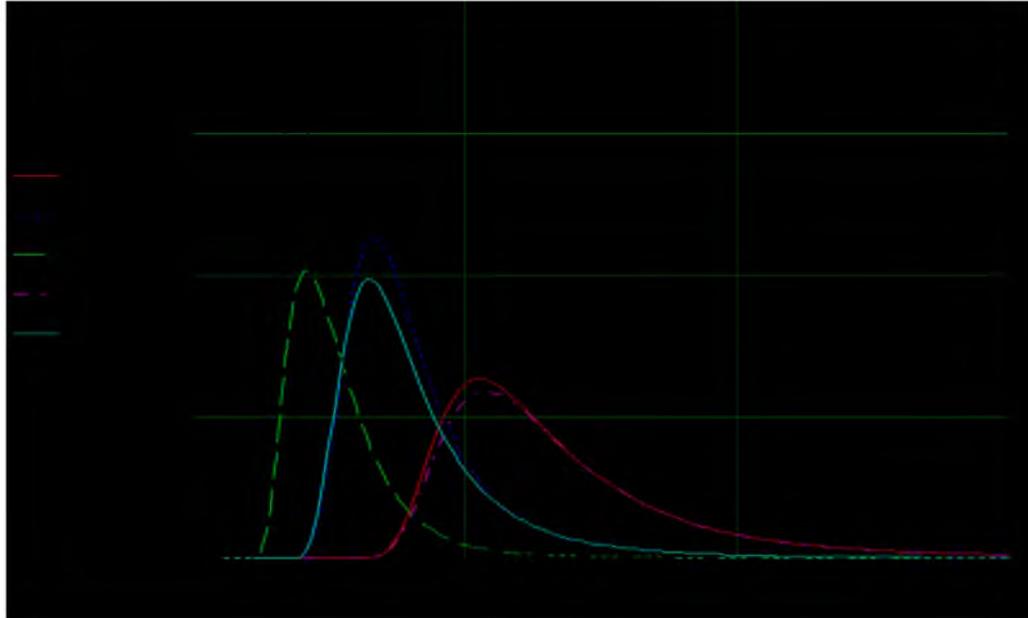


Рисунок 8 – Спектр $S_z(\omega_w)$ и спектр $S_z(\omega_w, H)$ с учётом глубины акватории при $h_{3\%} = 5$ м и глубине $H = 20$ м, для трёх степеней развитости волнения $K = 0.6, 1.0, 1.7$.

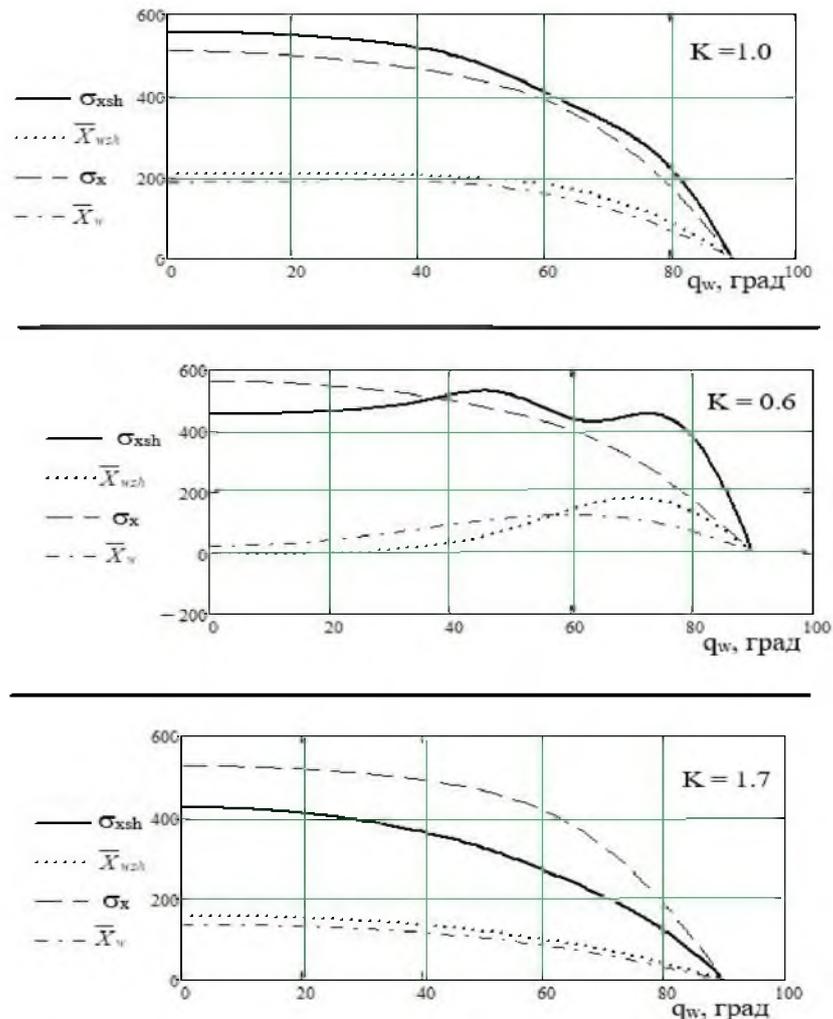


Рисунок 9 - Среднее значение продольного усилия на корпусе танкера и его СКО на глубине $H = 20$ м, в зависимости от курсового угла волн q_w ($h_{3\%} = 5$ м).

Сравнительный анализ графических материалов, представленных на рис. 9 свидетельствует о неоднозначности характера влияния мелководья на параметры силового воздействия волнения на танкер при различной степени развитости волнения, так, например, при $K = 1$ (развитое волнение) среднее значение продольного усилия и его СКО увеличиваются; при $K = 1.7$ (мертвая зыбь) среднее значение продольного усилия увеличивается, а его СКО уменьшается; при $K = 0.6$ (зарождающееся волнение) среднее значение до курсового угла волн в районе $q_w = 60^\circ$ уменьшается, затем увеличивается, СКО уменьшается до курсового угла $q_w = 40^\circ$, затем увеличивается в сравнении с этими же характеристиками на глубокой воде. Всё это свидетельствует о том, что учёт глубины района маневрирования при моделировании движения танкера в условиях волнового воздействия также необходим, как и влияние мелководья на гидродинамические характеристики корпуса.

Заключение

Представленная в статье методика расчёта параметров силового воздействия нерегулярного волнения может быть использована для моделирования движения танкера в условиях открытого моря с целью исследования и оценки возможности использования инновационных способов управления, разработанных авторами и направленных на существенное снижение уровня влияния человеческого фактора на безопасность судовождения при выполнении ключевых судовых операций.

Анализ информационных источников, в которых отражены результаты аналогичных исследований, позволяет сделать вывод о том, что результаты данной работы могут быть использованы и в решении ряда других прикладных задач в области судовождения без ограничения района плавания.

Литература

1. Агарков, С. А. Теоретические аспекты швартовки к борту судна, стоящего на якоре: монография / С.А. Агарков, Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев. – М.: Моркнига, 2015. – 177 с.: ил.
2. Вознесенский, А.И. Нормированный энергетический спектр морского волнения/А.И. Вознесенский, Ю.А. Нецветаев// Труды НТО Судпрома. – Л.: Судостроение, 1963, вып. 47, с. 22 – 39.
3. Теория волн на поверхности тяжелой жидкости /Ю.З. Аleshkov. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. - 196 с.
4. Юдин, Ю.И. Расчёт переменных составляющих воздействия регулярного волнения на танкер /Ю.И. Юдин, В.В. Перевозов//Эксплуатация морского транспорта.– 2019.– №1(90).– С. 38-45.
5. Юдин, Ю. И. Теоретические основы безопасных способов маневрирования при выполнении точечной швартовки: монография / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев, Г. И. Мартюк, А. Ю. Юдин. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2009. – 152 с. : ил.
6. Gadzhiyev, Y. Z., and Kratsitsky, B. B. 1978. "The Equilibrium Range of the Frequency Spectra of Wind-Generated Waves in a Sea of Finite Depth," *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics, USSR*, Vol 14, No. 3, pp 238-242.
7. Steven, A.H. 1984. «The TMA Shallow-Water Spectrum Description and Applications», Technical Report Cerc-84-7, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss. P. 42.

References

1. Agarkov, S. A., Yudin, Yu. I., Pashencev, S. V. (2015) *Teoreticheskie aspekty shvartovki k bortu sudna, stoyashchego na yakore. Morkniga. S. 177.*
2. Aleshkov, Yu. Z. (1981). *Teoriya voln na poverhnosti yazhelozhidkosti. Izd-vo LGU, S.196.*
3. Yudin, Yu.I., Perevozov, V.V. (2019). *Raschyot peremennykh sostavlyayushchikh vozdeystviya regul'yarnogo volneniya na tanker. Eksplyuatsiya morskogo transporta. 1(90), ss. 38 – 45.*
4. Yudin, Yu. I., Pashencev, S. V. Martyuk, G. I., Yudin, A. Yu. (2009). *Teoreticheskie osnovy bezopasnykh sposobov manevrirovaniya pri vypolnenii tochechnoy shvartovki. Izd-vo MGTU, S.152.*
5. Voznesenskij, A.I., Necvetaev Yu.A. (1963). *Normirovannyj energeticheskij spektr morskogo volneniya. Trudy NTO Sudproma. Sudostroenie, 47, ss. 22 – 39.*
6. Gadzhiyev, Y. Z., and Kratsitsky, B. B. 1978. "The Equilibrium Range of the Frequency Spectra of Wind-Generated Waves in a Sea of Finite Depth," *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics, USSR*, Vol 14, No. 3, pp. 238-242.
7. Steven, A.H. 1984. «The TMA Shallow-Water Spectrum Description and Applications», Technical Report Cerc-84-7, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss. P. 42.