

УДК [656.61.052.7:629.123.56]:[551.462/3:551.466.3.001.57]

М. А. Рамазанов, Ю. И. Юдин, В. А. Гроховский

УЧЕТ ГЛУБИНЫ АКВАТОРИИ В РАЙОНЕ ШВАРТОВКИ ТАНКЕРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлен способ учета влияния мелководья при моделировании волнового воздействия в районе выполнения швартовочной операции. Исследование выполнено посредством моделирования движения танкера, управляемого по отклонениям. Морские нефтяные терминалы, как правило, размещаются в районах с относительно небольшой глубиной, поэтому фактор влияния глубины акватории необходимо учитывать как существенный, определяющий характер волнового воздействия на крупнотоннажные танкеры. В условиях мелководья может существенно изменяться спектр волнения и, как следствие, характер силовых воздействий, определяемых им, что неизбежно влечет за собой изменение маневренных свойств швартуемого к нефтяному терминалу танкера. Для учета влияния глубины акватории в районе выполнения швартовочной операции был использован спектр ТМА (TEXEL storm, MARSEN, ARSLOE), который принимает во внимание одновременно и развитие ветровых волн в условиях конечной глубины, и смешанный характер волнения. Основным назначением представленных здесь спектров является не вычисление средних значений и дисперсий силовых воздействий, а генерация воздействия сил и моментов, образуемых нерегулярным волнением при программном моделировании движения танкера.

Ключевые слова: математическая модель, швартовочная операция, волновое воздействие, танкер.

Состояние проблемы

Инновационный способ управления морскими подвижными объектами при управлении по отклонениям носовой и кормовой точек от прицельной линии широко применяется в моделировании. Рассматриваемый способ (в том числе и при моделировании швартовочных операций) был неоднократно продемонстрирован в других работах [1–6]. В нашей работе предлагается способ учета мелководья при расчете влияния волнового воздействия на объекты швартовки.

Размещение морского нефтяного терминала, как правило, осуществляется в районах с относительно небольшой глубиной, поэтому фактор влияния глубины акватории необходимо учитывать как существенный, определяющий характер волнового воздействия на танкер при выполнении швартовочной операции. Это обстоятельство весьма характерно для крупнотоннажных танкеров, имеющих соответствующую осадку.

Методы и результаты исследования

В условиях мелководья может существенно изменяться спектр волнения и, как следствие, характер силовых воздействий, определяемых им, что неизбежно влечет за собой изменение маневренных свойств швартуемого к нефтяному терминалу танкера. Обычно для учета указанного фактора используют спектр ТМА (TEXEL storm, MARSEN, ARSLOE), который принимает во внимание одновременно и развитие ветровых волн в условиях конечной глубины, и смешанный характер волнения, которое может быть как в виде ветрового волнения, так и зыби. Спектр ТМА обычно представляют в такой форме:

$$S_{\zeta}^{\text{TMA}}(\omega, h_{3\%}, H) = \Phi(\omega, H) \cdot S_{\zeta}^{\text{JS}}(\omega, h_{3\%}).$$

В этом выражении справа представлен спектр рассматриваемого волнения на глубокой воде JONSWAP (Joint North Sea Wave Project), определяемый зависимостью:

$$S_{\zeta}^{\text{JS}}(\omega, h_{3\%}) = 7,04 \frac{m_0}{\bar{\omega}} \left(\frac{\omega_{\text{max}}}{\omega}\right)^5 \exp\left[-1,25\left(\frac{\omega_{\text{max}}}{\omega}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-(\omega - \omega_{\text{max}})^2 / 2\sigma^2 \omega_{\text{max}}^2\right].$$

В спектр JONSWAP (JS) входят два параметра, которые позволяют получить его в виде модификации широко применяемого спектра Пирсона – Московича (P–M). Параметр γ характеризует превышение максимума спектра JS над максимумом спектра P–M (обычно он берется равным 2). Параметр σ характеризует ширину участка спектра JS, превосходящего по величине спектр P–M. Обычно указанный параметр выбирается следующим способом:

$$\sigma = 0,07 \text{ при } \omega < \omega_m;$$

$$\sigma = 0,09 \text{ при } \omega^3 \geq \omega_m.$$

Остальные параметры стандартны для всех спектров: $\bar{\omega}$ – средняя частота волнения; ω_{\max} – максимальная частота; m_0 – параметр, выбираемый так, чтобы $\int S^{JS}(\omega)d\omega = HS^2 / 16$; HS – значительная высота волны, обозначаемая как $h_{1/3}$.

Представленные параметры можно выразить через одну характеристику интенсивности волнения, например, через высоту волны 3%-й обеспеченности $h_{3\%}$:

$$\bar{\omega} = 1,904 / \sqrt{h_{3\%}}; \quad \omega_m = 1,424 / \sqrt{h_{3\%}}; \quad HS = 0,755h_{3\%}.$$

Редукционная функция частоты спектра за глубину моря $\Phi(\omega, H)$ имеет следующее выражение:

$$\Phi(\omega, H) = th(\omega^2 H/g) + \omega^2 H/g \cdot ch^{-2}(\omega^2 H/g).$$

Для демонстрации влияния глубины моря H на характер спектра на рис. 1 показаны три спектра для высоты волны 3 %-й обеспеченности, равной 5 м. Это JS спектр для глубокой воды и спектр ТМА для глубины моря 20 и 50 м. На рис. 1 хорошо прослеживается, что при уменьшении глубины моря падает доля частот в низкой области и растет их доля в верхней области. На рис. 2 приведен фрагмент программы MathCad¹ для расчета спектра с учетом глубины акватории.

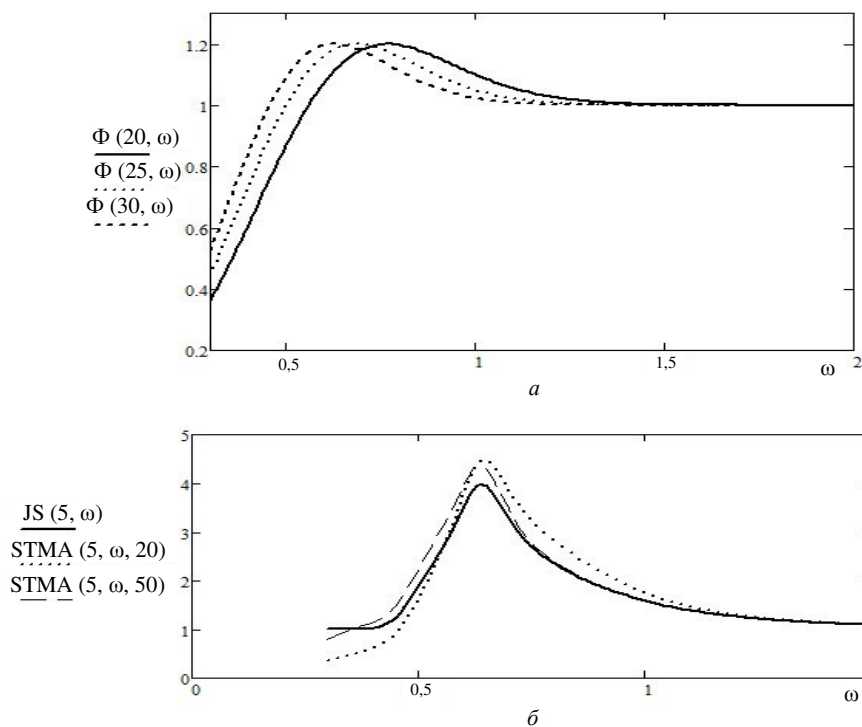


Рис. 1. Фактор глубины акватории для трех глубин моря (20, 25 и 30 м): вертикальная ось – редукционная функция частоты спектра за глубину моря, горизонтальная ось – частота волнения (а); спектры JS и STMA для глубины моря 20 и 50 м: вертикальная ось – спектры волнения, горизонтальная ось – частота волнения (б)

¹ В компьютерной программе расчета использованы обозначения: STMA – спектр ТМА; YТМА – поперечная составляющая усилия на корпусе танкера от воздействия нерегулярного волнения в условиях мелководья; МТМА – вращающий момент на корпусе танкера от воздействия нерегулярного волнения в условиях мелководья.

$$\Phi(H, \omega) := \tanh\left(\frac{H \cdot \omega^2}{gg}\right) + \frac{(H \cdot \omega^2)}{gg \cdot \left(\cosh\left(\frac{H \cdot \omega^2}{gg}\right)\right)^2}$$

$$\Omega_{\max}(h) := \frac{1.424}{\sqrt{h}}$$

$$\text{sigm}(\omega, h) := \begin{cases} a \leftarrow 0.07 & \text{if } \omega < \Omega_{\max}(h) \\ a \leftarrow 0.09 & \text{if } \omega \geq \Omega_{\max}(h) \\ \text{return } a \end{cases}$$

Спектр JONSWAP с редукцией глубины

$$JS(h, \omega) := 0.25 \cdot \frac{h^2}{\Omega_{cp}(h)} \cdot \left(\frac{\Omega_{\max}(h)}{\omega}\right)^5 \cdot \exp\left[-1.25 \cdot \left(\frac{\Omega_{\max}(h)}{\omega}\right)^4\right] + 2 \cdot \frac{\exp\left[\frac{-(\omega - \Omega_{\max}(h))^2}{2 \cdot \text{sigm}(\omega, h)^2 \cdot (\Omega_{\max}(h))^2}\right]}{2 \cdot \text{sigm}(\omega, h)^2 \cdot (\Omega_{\max}(h))^2}$$

$$STMA(h, \omega, H) := JS(h, \omega) \cdot \Phi(H, \omega)$$

Рис. 2. Фрагмент программы MathCad для расчета спектров JS и STMA (рис. 1)

Данные рис. 1 и 2 демонстрируют, как изменяются усилия от действия нерегулярного волнения и их средние значения. Для примера на рис. 3 приведены средние значения амплитуды поперечной силы с учетом глубины моря, фрагмент программы MathCad для их расчета и формулы MathCad для соответствующих вычислений усилий.

$$Y_{wTMAsr}(h, q, H) := \int_{0.3}^{1.5} Y_{w0}\left(q, \frac{61.638}{\omega^2}, h\right) \cdot \frac{4 \cdot STMA(h, \omega, H)}{h^2} d\omega$$

$$Y_{wJSsr}(h, q) := \int_{0.3}^{1.5} Y_{w0}\left(q, \frac{61.638}{\omega^2}, h\right) \cdot \frac{4 \cdot JS(h, \omega)}{h^2} d\omega$$

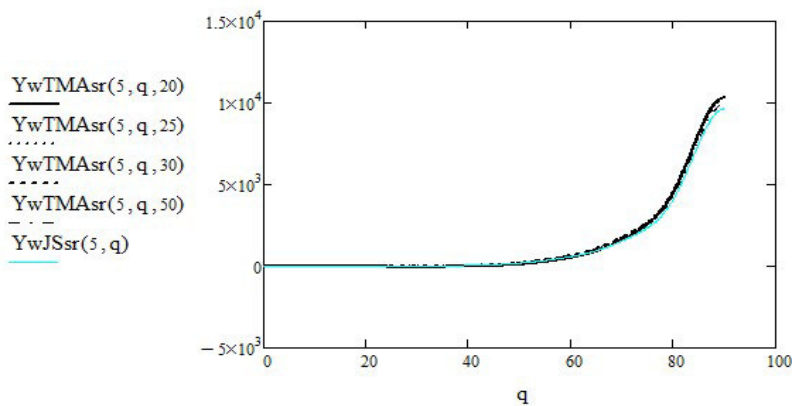


Рис. 3. Средние значения амплитуды поперечного усилия при различных значениях курсового угла волнения (q) для высоты волны $h_{3\%} = 5$ м для глубокой воды и глубины моря 20, 25, 30 и 50 м

Отметим, что средние значения почти не зависят от глубины. Дело в том, что спектр за счет глубины смещается, но суммарная интенсивность его остается примерно на одном уровне. Следует отметить, что изменения амплитуд усилий на разных частотах более заметны. Это продемонстрировано на рис. 4 (для поперечного усилия) и рис. 5 (для вращающего момента). Построены спектральные плотности поперечного усилия и момента для глубокого моря и глубины 30 м (в верхней части рисунка приведены формулы MathCad для соответствующих вычислений усилий).

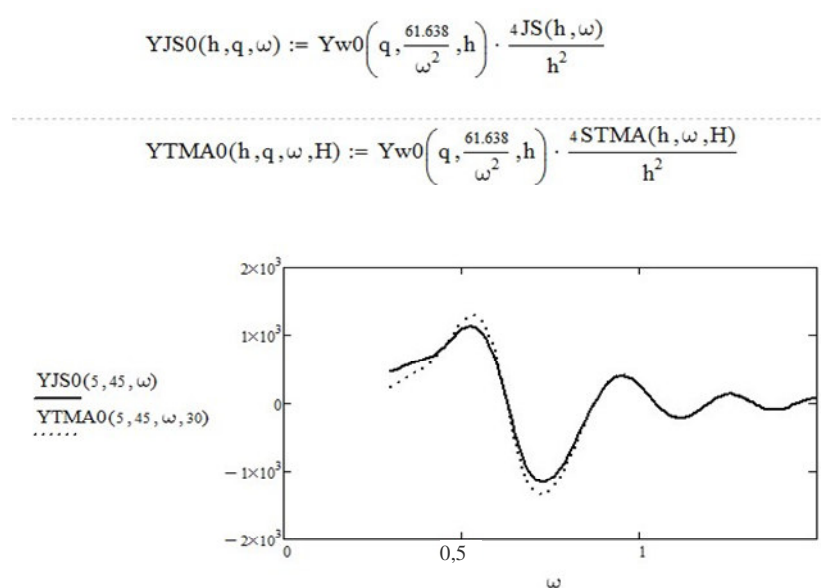


Рис.4. Влияние глубины акватории на амплитуду поперечного усилия на различных частотах: танкер в грузу, высота волны 5 м, угол волнового дрейфа 45°, глубина моря 30 м

На нижних частотах в диапазоне 0,3–0,7 Гц разница между спектрами вполне ощутима, ее необходимо учитывать в моделировании движения танкера при выполнении швартовной операции.

$$MJS0(h, q, \omega) := Mw0\left(q, \frac{61.638}{\omega^2}, h\right) \cdot \frac{4JS(h, \omega)}{h^2}$$

$$MTMA0(h, q, \omega, H) := Mw0\left(q, \frac{61.638}{\omega^2}, h\right) \cdot \frac{4STMA(h, \omega, H)}{h^2}$$

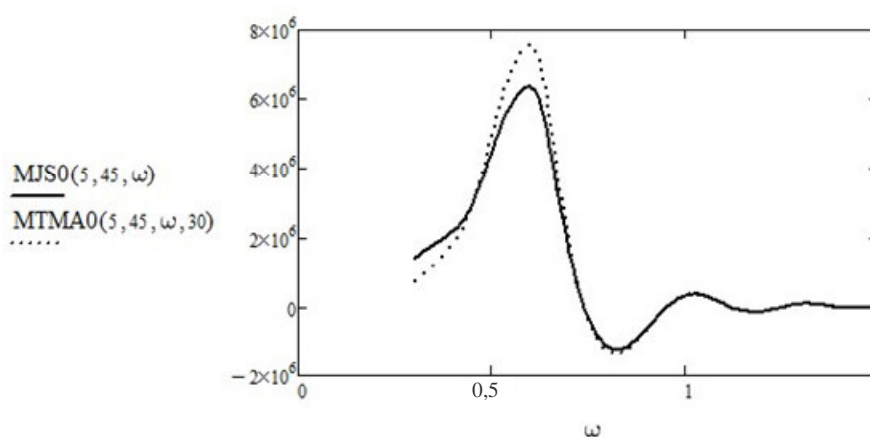


Рис. 5. Влияние глубины акватории на амплитуду вращающего момента на различных частотах: танкер в грузу, высота волны 5 м, угол волнового дрейфа 45°, глубина моря 30 м

Таким образом, представлен алгоритм расчета силового воздействия на танкер со стороны нерегулярного волнения с учетом глубины акватории, где выполняется швартовная операция. Это позволяет оценить степень влияния глубины акватории в районе выполнения швартовки, что повышает достоверность результатов моделирования процесса швартовки танкера в условиях мелководья с использованием способа управления по отклонениям.

Выводы

Основным назначением представленных здесь спектров является не вычисление средних значений и дисперсий силовых воздействий, а генерация воздействия волновых сил и моментов, образуемых нерегулярным волнением при программном моделировании движения танкера. Исследование по данной теме подробно представлено в других наших работах в контексте проблемы генерации случайных значений сил и моментов при моделировании движения танкера, управляемого по отклонениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холичев С. Н. Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера на финальном этапе сближения судов «борт к борту» с использованием инновационного способа управления судном / С. Н. Холичев, С. А. Агарков // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 88–93.
2. Холичев С. Н. Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера с использованием инновационного способа управления судном / С. Н. Холичев, Ю. И. Юдин, С. О. Петров // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 81–87.
3. Юдин Ю. И. Моделирование процесса управляемого движения судна вдоль линии положения / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2013. Т. 16, № 1. С. 141–147.
4. Юдин Ю. И. Моделирование управляемого движения судна по произвольной траектории / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев // Эксплуатация водного транспорта. 2012. № 3 (69). С. 32–36.
5. Петров С. О. Моделирование движения танкера на нефтяном терминале в открытом море при управлении на перекрестии / С. О. Петров, Ю. И. Юдин, С. Н. Холичев // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 18, № 3. С. 60–67.
6. Петров С. О. Стратегия управления движением танкера на перекрестии / С. О. Петров, С. А. Агарков // Вестн. Мурманск. гос. техн. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 55–59.

Статья поступила в редакцию 04.04.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рамазанов Мейлан Абдуллаевич – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; аспирант кафедры «Судовождение»; ramazanov.m@mail.ru.

Юдин Юрий Иванович – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; г-р. техн. наук, профессор; директор Морского института; yudinyui@mstu.edu.ru.

Гроховский Владимир Александрович – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; г-р техн. наук; профессор кафедры «Технологии пищевых производств»; grohovskiyva@mstu.edu.ru.



M. A. Ramazanov, Yu. I. Yudin, V. A. Grokhovskiy

ACCOUNT FOR THE DEPTH OF WATERS IN THE AREA OF TANKER MOORING WHILE MODELING WAVE EFFECTS

Abstract. The paper presents a way of accounting for the influence of shallow water in the simulation of wave action in the area of performing the mooring operations. This research was made by means of modeling of the tanker traffic, operated by deflections. Marine oil terminals, as a rule, are placed in the areas with relatively shallow depth, so the impact factor of depth of waters must be considered as an essential, defining the nature of the wave action on the large-capacity tanker. In shallow waters the spectrum of excitement can significantly change, and, as a conse-

quence, the nature of power influences, determined by it, can change too; it inevitably entails a change in maneuverable properties of the tanker moored to the oil terminal. To account for the impact of the depth of waters when mooring TMA (TEXEL storm, MARSEN, ARSLOE) spectrum, which takes into account both the development of wind waves in a finite depth and the mixed nature of the excitement, was used. The main purpose of the spectra presented herein is not a calculation of average values and variances of force effects, but the generation of the force impacts and moments of the irregular waves in the software simulation of tanker movement.

Key words: mathematical model, mooring operation, wave effect, tanker.

REFERENCES

1. Kholichev S. N., Agarkov S. A. Modelirovanie protsessa shvartovki k bortu sudna-partnera na final'nom etape sbližheniia sudov «bort k bortu» s ispol'zovaniem innovatsionnogo sposoba upravleniia sudnom [Modeling of the mooring to the ship-partner board at the final stage of approach of the ships aboard using innovative methods of ship handling]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 88–93.
2. Kholichev S. N., Iudin Iu. I., Petrov S. O. Modelirovanie protsessa shvartovki k bortu sudna-partnera s ispol'zovaniem innovatsionnogo sposoba upravleniia sudnom [Modeling of the mooring to the board of the ship-partner using the innovative method of ship handling]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 81–87.
3. Iudin Iu. I., Pashentsev S. V. Modelirovanie protsessa upravliaemogo dvizheniia sudna vdol' linii polozheniia [Modeling of the controlled ship movement alongside its position line]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 141–147.
4. Iudin Iu. I., Pashentsev S. V. Modelirovanie upravliaemogo dvizheniia sudna po proizvol'noi traektorii [Modeling of the controlled ship movement at the random trajectory]. *Ekspluatatsiia vodnogo transporta*, 2012, no. 3 (69), pp. 32–36.
5. Petrov S. O., Iudin Iu. I., Kholichev S. N. Modelirovanie dvizheniia tankera na neftianom terminale v otkrytom more pri upravlenii na perekrestii [Modeling of the tanker movement at the oil terminal in the open sea at cross wires handling]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 60–67.
6. Petrov S. O., Agarkov S. A. Strategiiia upravleniia dvizheniem tankera na perekrestii [Strategy of control the tanker movement at cross wires]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 55–59.

The article submitted to the editors 04.04.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ramazanov Meilan Abdullaevich – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Navigation"; ramazanov.m@mail.ru.

Yudin Yuriy Ivanovich – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Director of Marine Institute; yudinyui@mstu.edu.ru.

Grokhovskiy Vladimir Aleksandrovich – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Doctor of Technical Sciences; Professor of the Department "Technology of Food Production"; grohovskiyva@mstu.edu.ru.

