

УДК: 627.33

Ю.Г. Жемойдо, вед. инженер*,

В.М. Кушнир, профессор, д-р техн. наук,

М.К. Ларин**

*ЦКБ «Коралл», ул. Репина 1, г. Севастополь, Украина, 99053

**Севастопольский национальный технический университет,

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: kushnir@sevinter.net

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА МОРСКОЙ ТЕРМИНАЛ:**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ**

Представлены результаты численных расчетов гидродинамического давления и инерционной силы при воздействии морских волн и течений на ледостойкий терминал пирамидальной формы. Полученные данные сопоставлены с результатами лабораторных исследований физической модели терминала в волновом бассейне.

Введение. Определение гидродинамических нагрузок на океанотехнические системы при воздействии стационарных течений и морских волн малой обеспеченности является необходимым и, во многих отношениях, определяющим этапом их проектирования. Традиционные методы расчетов основаны на использовании моделей различных спектров поверхностных волн и известных полуэмпирических соотношений. Такой метод имеет относительно низкую точность, так как коэффициенты гидродинамических и инерционных сил точно неизвестны, а для новых конфигураций морских установок они вообще не определены. В связи с этим, целью настоящей работы является трехмерное моделирование воздействия морских течений и волн на морскую платформу нового типа – ледостойкий терминал пирамидальной формы. Для верификации полученных данных использованы результаты лабораторных исследований физической модели терминала в волновом бассейне.

В качестве модели спектра поверхностных волн использована модель ТМА, которая учитывает развитие ветровых волн в условиях моря конечной глубины и смешанный характер волнения (ветровое волнение и зыбь). Спектральная модель ТМА представляется в виде

$$S_{TMA}(\omega, H) = \Phi_K(\omega, H) \cdot S_{JS}(\omega), \quad (1)$$

где $S_{TMA}(\omega, H)$ – спектральная плотность волнения на мелководье; $S_{JS}(\omega)$ – спектральная плотность волнения на глубокой воде (используется аппроксимация спектра вида JONSWAP);

$$\Phi_K(\omega, H) = \left(\frac{k_0(\omega, \infty)}{k(\omega, H)} \right)^3 \frac{\partial k(\omega, H) / \partial \omega}{\partial k_0(\omega) / \partial \omega} - \text{поправка Китайгородского для мелкой воды; } k(\omega, H) = gk \tanh(kH)$$

– волновое число, соответствующее частоте ω на глубине H ; $k_0(\omega, \infty)$ – волновое число, соответствующее частоте ω на глубокой воде. Обычно используется следующее аналитическое представление спектра JONSWAP:

$$S_{JS}(\omega) = 7.04 \frac{m_0}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^5 \cdot \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^4 \right] \gamma \cdot \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2} \right],$$

где m_0 – параметр спектра, при котором $\int S_{JS}(\omega) d\omega = \frac{HS^2}{16}$; HS – значительная высота волны, связанная

с высотой волны 3 % обеспеченности соотношением $H_{3\%} = 1,32 \cdot HS$; ω – круговая частота; $\bar{\omega}$ – средняя

частота волнения; $\bar{\omega} = \frac{2\pi}{T_Z}$; T_Z – средний период волнения; ω_m – частота максимума спектра; $\omega_m = \frac{2\pi}{T_P}$;

T_P – период максимума спектра; γ – параметр спектра, характеризующий превышение максимума спектра JONSWAP над спектром Пирсона – Московича, принятый в расчетах равным 2,5; σ – параметр спектра, характеризующий ширину участка спектра JONSWAP, превосходящего по величине спектр Пирсона – Московича: $\sigma = 0,07$ при $\omega \leq \omega_m$. $\sigma = 0,09$ при $\omega > \omega_m$.

Средняя частота волнения связана с частотой максимума спектральной плотности ω_m соотношением: $\bar{\omega} = (1,49 - 0,102\gamma + 0,0142\gamma^2 - 0,00079\gamma^3)\omega_m$.

Результаты расчета спектра ТМА (1) для заданных волновых условий используются для вычисления профилей составляющих скорости волнового течения по глубине и затем, для расчетов гидродинамической нагрузки на сооружение [1]. Основные недостатки этого метода состоят в

следующем: 1. Не учитываются эффекты искажения спектра волн вследствие влияния сооружения; 2. Коэффициенты сопротивления для конструкций сложной формы неизвестны.

В связи с этим, при создании неординарных конструкций необходимо проводить физические лабораторные эксперименты с моделью сооружения; этот этап существенно увеличивает сроки производства проектных работ и стоимость проекта. Кроме этого, обычно при лабораторных условиях не удается выполнить все основные механические критерии подобия, что может привести к погрешностям результатов пересчета данных лабораторных испытаний на натурные условия. Существенным недостатком является также невозможность вариации конструктивных параметров сооружения и таким образом найти его оптимальное конструктивное решение. От этих недостатков в значительной степени свободны методы численного моделирования гидродинамического воздействия волн и течений на океанотехнические системы.

Возможности современных ЭВМ позволяют решать такие задачи, используя CAE (*Computer Aided Engineering*) – системы для проведения математического моделирования воздействия гидродинамических процессов на конструкции сложной формы. Для этого необходимо создание трехмерной модели океанотехнической системы в какой-либо геометрической системе и ее экспорт в расчетную область пакета прикладной программы типа COSMOSFloWorks [2]. На границах этой расчетной области задаются в общем случае произвольные граничные условия, содержащие данные о параметрах волн и течений, воздействующих на проектируемую конструкцию.

В настоящей работе использован метод трехмерного моделирования воздействия морских течений и волн на ледостойкий терминал пирамидальной формы. Для верификации полученных данных использованы результаты лабораторных исследований физической модели терминала в волновом бассейне.

Метод решения. В пакете прикладных программ COSMOSFloWorks движение и теплообмен текучей среды при ее взаимодействии с обтекаемым объектом рассчитывается на основе уравнений Навье - Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии. Для моделирования турбулентных течений используется осреднение уравнения Навье - Стокса по Рейнольдсу, т.е. турбулентные составляющие параметров течения осредняются по некоторому масштабу времени и пространства. При этом необходимо вычислять тензор вязких напряжений Рейнольдса, для чего вводятся уравнения переноса кинетической энергии, а также ее диссипации на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Кроме этого, используются уравнения состояния компонентов текучей среды и эмпирические зависимости для вязкости и теплопроводности этих компонентов. Таким образом, моделируются пространственно-временные поля турбулентных, переходных и ламинарных течений, содержащие неоднородности с масштабами более крупными по отношению к масштабам осреднения исходных уравнений. Техника таких численных расчетов получила название «моделирование больших вихрей» или Large Eddy Simulation (LES). Обзоры этих методов можно найти в работах [3 – 5].

Система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \cdot u_k) = 0, \quad \frac{\partial (\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \cdot u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H.$$

Здесь t – время; u – скорость среды; ρ – плотность; P – давление; S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу; $S_{iporous}$ – действие сопротивления пористого тела; $S_{igravity}$ – действие гравитации; $S_{irootation}$ – действие вращения системы координат, т.е. $S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irootation}$; E – полная энергия единичной массы; Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q – диффузионный тепловой поток. Нижние индексы означают суммирование по трем координатам направления.

Для ньютоновских текучих сред тензор вязкости сдвиговых напряжений определяется как

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t$; μ – коэффициент динамической вязкости; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости; δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$); k – кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с $k - \varepsilon$ моделью турбулентности, μ_t определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε , т.е.

$\mu_i = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$, $f_\mu = [1 - \exp(-0,025 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right)$; $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l}$; $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon}$, где y – расстояние от поверхности стенки, $C_\mu=0,09$.

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения следующих двух уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \quad \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon.$$

Здесь $S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_l P_B$, $S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_l \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$,

$$\tau_{ij}^R = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}; P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad g_i - \text{составляющая гравитационного ускорения в}$$

направлении x_i ; $\sigma_B=0,9$; $C_B = 1$ при $P_B > 0$ и $C_B = 0$ при $P_B \leq 0$; $f_l = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3$; $f_l = 1 - \exp(-R_T^2)$; $C_{\varepsilon l}=1,44$;

$C_{\varepsilon 2}=1,92$; $\sigma_\varepsilon=1,3$; $\sigma_k=1$.

Для моделирования ламинарных течений данная система уравнений несколько модифицируется, а именно полагается $\mu_i = 0$ и $k = 0$. С помощью функции f_μ моделируется переход ламинарного течения в турбулентное и турбулентного в ламинарное.

Ламинарные и турбулентные пограничные слои течения около поверхностей твердого тела, а также переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный и, наоборот, турбулентного в ламинарный, моделируются с высокой точностью с помощью модифицированных универсальных пристеночных функций.

Граничные условия: Со стороны внешнего (входящего) потока задаются профили волнового течения с потенциалом скорости, равным

$$F(x, y, z, t) = \frac{a \operatorname{ach}(kz)}{ksh(kH)} \cos(\omega t - kx \cos \alpha - ky \sin \alpha),$$

где оси координат образуют декартову систему, показанную на рисунке 1; a – амплитуда волны; α – угол между продольной осью ПБУ ox и волновым вектором. На поверхности моря задается линеаризованное динамическое условие

$$\omega^2 w + g \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

где w – вертикальная волновая скорость.

На поверхности моря дрейфовая скорость течения U_p образует с осью ox угол β . Составляющие поверхностного течения вдоль осей ox, oy вычисляются с использованием эмпирического соотношения

$$U_p = (-3 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0,0012 \cdot H) \cdot W + (-6 \cdot 10^{-6} \cdot H^2 + 0,0025 \cdot H),$$

$$U_s = U_p \cos \beta, \quad V_s = U_p \sin \beta,$$

где W – скорость ветра. Профиль скорости стационарного течения $u_s(z)$ задается в соответствии с моделью Прандтля для пограничного слоя

$$u_s(z) = U_s \text{ при } z \geq \Delta \text{ и } u_s(z) = U_s [(H - z)/\Delta]^{1/7}; \text{ при } -H \leq z \leq -H + \Delta,$$

где Δ – толщина придонного пограничного слоя, равная [6]

$$\Delta = [0,045 \frac{U_p}{f} (\frac{\nu_m}{U_p})^{0,25}]^{0,8},$$

f – параметр Кориолиса, $\nu_m = 1,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с – молекулярная вязкость.

Например, при $H=10$ м, $f = 1 \cdot 10^{-4}$ рад/с, $W = 40$ м/с, скорость дрейфового течения U_p на поверхности моря равна 0,384 м/с, толщина придонного пограничного слоя $\Delta = 5,04$ м.

На поверхности терминала и на дне задается условие прилипания.

На границе вытекающего потока задается радиационное условие Зоммерфельда для нормальной составляющей скорости течения.

Для проведения расчета трехмерная модель терминала с осадкой 19,7 м была помещена в расчетную область с $l \times b \times h = 300 \times 200 \times 19,7$ м. Плотность воды $\rho = 1,025$ кг/м³. Генерация расчетной сетки происходила с учетом конструктивных особенностей терминала, т.е. с её разбиением на мелкие части в

слоях, находящихся в непосредственной близости от его поверхности, что позволяет более точно отразить процесс гидродинамического взаимодействия. Всего сформировано 44283 ячейки, с объемом от 50 м^3 до $0,7 \text{ м}^3$. Расчеты проводились методом конечных объемов в течение 29 секунд физического времени (более 100 итераций), до достижения сходимости. Это соответствует примерно трем периодам волн.

Расчетная область решения задачи с моделью терминала показана на рисунке 1.

Суммарные волновые нагрузки вычисляются по формуле

$$F_{\text{сум}} = \sqrt{F_{\text{гидр}}^2 + F_{\text{инерц}}^2},$$

где $F_{\text{гидр}}$ – гидродинамические волновые нагрузки, вычисленные по величине перепада давления, МН; $F_{\text{инерц}}$ – инерционные волновые нагрузки, МН, которые определяются на основе Теоремы о количестве движения жидкой среды [6] по соотношению

$$F_{\text{инерц}} = \rho S \frac{\partial}{\partial t} \left[\int \int_{x,z} u(x,z) dx dz \right], \quad (2)$$

где S – площадь сечения терминала, перпендикулярная потоку. Интегрирование горизонтальной составляющей вектора скорости течения производится по всей расчетной области (рисунок 1).

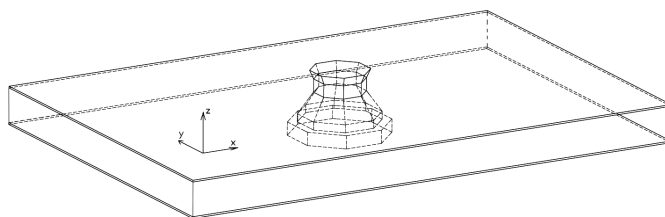


Рисунок 1 – Расчетная область решения краевой задачи гидродинамического взаимодействия терминала с постоянным и волновым течением

Результаты исследований. Расчет нестационарных полей скорости течения и давления выполнен для трех длин волн $\lambda_1=130 \text{ м}$, $\lambda_2=154 \text{ м}$, $\lambda_3=170 \text{ м}$. Высота волны с обеспеченностью 0,1 % равна 8,8 м, период 9,2 с. Скорость течения принята равной 0,6 м/с и постоянной по глубине за исключением придонного пограничного слоя. Эти параметры волн и скорость течения были получены на основе данных климатического справочника по району установки терминала.

Характерные примеры горизонтального и вертикального векторных полей скорости течения при обтекании терминала показаны на рисунках 2 и 3.

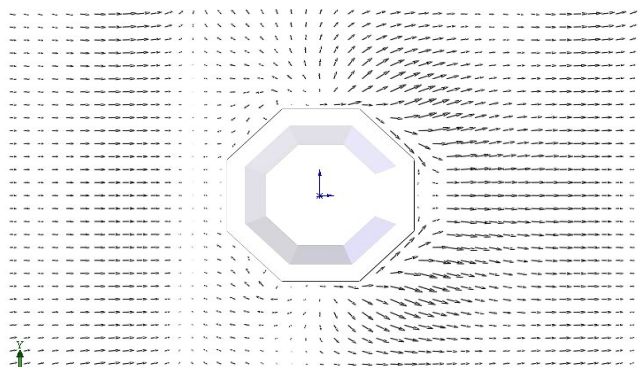


Рисунок 2 – Горизонтальное поле скорости течения при обтекании терминала (направление распространения волн и среднего течения совпадает с осью x)

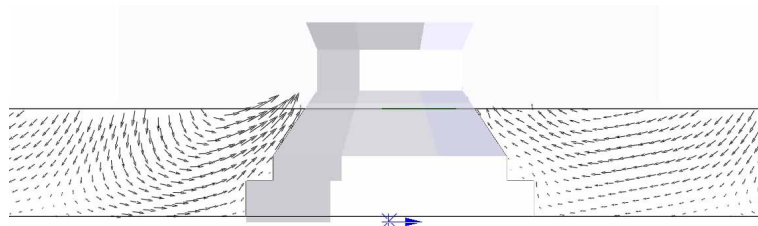


Рисунок 3 – Вертикальное поле скорости течения при обтекании терминала

Результаты численного расчета поля давления были использованы для определения гидродинамических нагрузок на терминал. Для этого рассчитывались перепады давления на передних

стенках терминала, которые находятся в зоне воздействия волны, и на его задних стенках. Результаты расчета для трех указанных длин волн показаны на рисунке 4.

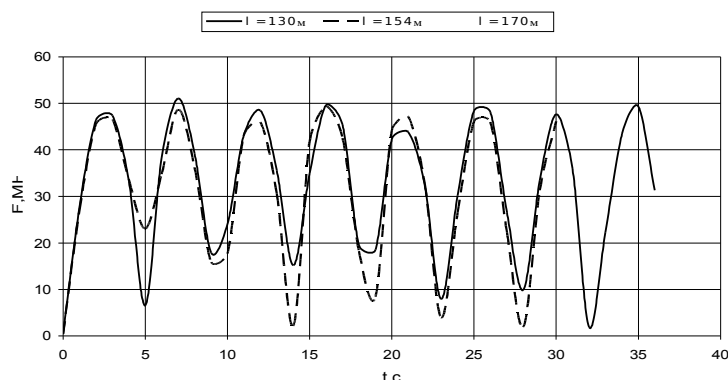


Рисунок 4 – Изменение во времени суммарной (гидродинамической и инерционной) нагрузки на терминал при трех длинах волн

Результаты численного моделирования показали, что максимальная гидродинамическая нагрузка на терминал достигает 50...52 МН и практически не зависит от длины волны. Это соответствует теории поверхностных волн на «мелкой» воде, когда глубина моря (в данном случае 15...19 м) значительно меньше половины длины волны, равной 65...85 м. При таком соотношении этих параметров волновая скорость практически постоянная по глубине за исключением тонкого придонного пограничного слоя и от длины волны не зависит [1]. Другим результатом моделирования является существенное отклонение переменного давления от гармонической зависимости, которая задана на левой границе расчетной области. Этот эффект стал следствием взаимодействия заданного гармонического волнового течения с преградой в виде терминала.

Инерционная составляющая нагрузки, вычисленная по соотношению (2), оказалась равной 56,24 МН, а суммарная нагрузка для волн с указанными параметрами $F_{\text{сум}} = 75,25...76,60$ МН.

Физическая модель терминала в масштабе 1:70 была подвергнута лабораторным исследованиям в волновом бассейне. Полученные при этих исследованиях результаты приведены в таблице 1. Там же указаны значения относительных погрешностей измерения как сумма погрешностей измерения параметров волн и усилий [7].

Таблица 1 – Величины суммарной гидродинамической нагрузки на морской терминал под действием регулярных поверхностных волн и постоянного течения со скоростью 0,6 м/с

Параметры	Длина волны, высота волны, м	Результат натурных испытаний, МН	Погрешность, %
1. $F_{\text{сум}}$	130; 8,8	70,70	6,0...6,1
2. $F_{\text{сум}}$	154; 8,8	73,68	2,9...3,1
3. $F_{\text{сум}}$	170; 8,8	71,24	6,6...6,9

Эти результаты в целом соответствуют данным, полученным при численном моделировании.

ВЫВОДЫ

Результаты численного моделирования процесса взаимодействия ледостойкого терминала с постоянными и волновыми течениями показали высокую эффективность применения прикладного пакета COSMOSFloWorks. Эта эффективность обусловлена следующими факторами:

- вычисленные в результате моделирования гидродинамические нагрузки соответствуют данным физических лабораторных экспериментов;
- нестационарные поля скорости течения, полученные в результате моделирования, могут быть использованы для расчета эрозии грунта вблизи и непосредственно под основанием терминала, а также для расчета диффузии нефти при авариях или утечках;
- моделирование рассмотренного типа является по существу современным инструментом для проектирования аналогичных океанотехнических систем, и в том числе для решения проблемы оптимизации конструктивных решений;
- если существует необходимость проведения лабораторных исследований физических моделей океанотехнических систем, то предварительное моделирование позволит целенаправленно задать условия проведения таких экспериментов и выполнить независимый контроль их результатов;

– возможность задания практически любых воздействий на проектируемое устройство при численном моделировании обеспечивает возможность получения оценок предельных или критических условий его эксплуатации.

Дальнейшие исследования процесса воздействия волновых и постоянных течений на морской ледостойкий терминал будут направлены на детальные исследования структуры полей скорости течения и давления, формирующихся в вихревом следе за терминалом. Эти данные остро необходимы для определения условий безопасной эксплуатации таких систем при осуществлении погрузочно-отгрузочных операций с использованием крупнотоннажных танкеров.

Библиографический список

1. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / Т. Доусон. — Л.: Изд-во Судостроение, 1986. — 286 с.
2. Компьютерное моделирование в инженерной практике SolidWorks / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.Б. Одинцов и др. — СПб: Изд-во БХВ, 2005. — 800 с.
3. Meneveau C. Scale-Invariance and Turbulence Models for Large-Eddy Simulation / C. Meneveau, J. Katz // Annual Rev Fluid Mech. — 2000. Is. 32. — P. 1 – 32.
4. Lesieur M. New trends in large-eddy simulation of turbulence / M Lesieur, O. Metais // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1996. — Is. 28. — P. 45 – 82.
5. Piomelli U. Wall-Layer Models for large-Eddy Simulations / U. Piomelli, E. Balaras // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2000. — Is. 34. — P. 349 – 374.
6. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. — М.: Судостроение, 1949. — 520 с.

Поступила в редакцию 14.06.2006 г.