

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ РАЗМЫВА ОКЕАНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

**SPECIALIZED SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR CALCULATING THE DYNAMICS OF EROSION OF OCEAN STRUCTURES**

**V. Dushko  
E. Khudyakov**

*Summary.* The structure, the main algorithms for ensuring the functioning of the software and hardware complex for determining the characteristics of soil erosion near the support foundations of ocean-technical installations under the influence of wave and constant currents are considered.

*Keywords:* hardware-software complex, soil dynamics, block, module.

**Душко Вероника Ростиславовна**

К.т.н

Севастопольский государственный университет

VRDushko@sevsu.ru

**Худяков Егор Сергеевич**

Лаборант-исследователь

Севастопольский государственный университет

ESHudyakov@sevsu.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрены структура, основные алгоритмы обеспечения функционирования программно-аппаратного комплекса для определения характеристик эрозии грунтов вблизи опорных фундаментов океанотехнических сооружений под воздействием волн и постоянных течений.

*Ключевые слова:* программно-аппаратный комплекс, динамика грунта, блок, модуль.

**В**заимодействие волны и стационарных течений с различными препятствиями на морском дне рассматривается во многих публикациях. В большинстве этих работ рассматриваются дизайн простой формы, а расчеты выполнены в двумерной постановке.

Первые гидродинамические нагрузки на неподвижной цилиндрической колонне изучены Морисоном, из которых нагрузки модели волны  $f_T$  на единицу длины колонны определяется соотношением (1):

$$f_T = 0,5\rho C_{ck} V_x |V_x| + 0,25\rho\pi D_{кол}^2 C_a a \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{кол}$  — диаметр колонны, м;  $C_{ck}$ ,  $C_i$  — коэффициенты сопротивления и инерционный компонент нагрузки волны. Значения этих коэффициентов зависят от безразмерных чисел Кьюлегана-Карпентера ( $K = VT_w/D_{кол}$ ). Вот  $V$  — амплитуда скорости потока волны, м/с,  $T_w$  — период волны, м,  $D_{кол}$  — диаметр колонны, м),  $V_x$ ,  $a_x$  — соответственно горизонтальная скорость потока волны и ускорение волны, м/с м<sup>2</sup>/с [].

Количество экспериментальных данных, устанавливающих зависимость коэффициентов модели безразмерных чисел Кьюлегана-Карпентера, очень ограничено и, следовательно, на практике, для простоты

коэффициенты принимают как постоянную расчетом. В работе [3] приведены соотношения для расчета значений коэффициентов сопротивления, а также их размеров в соответствии с рекомендациями различных распорядительных документов. Таким образом, для элементов опорной базы ПБУ значение коэффициента скоростного сопротивления располагается в диапазоне 0,5...0,75, для призм с прямоугольным сечением-1,0...2,0. По результатам модельных испытаний, приведенным в [4], коэффициент сопротивления для прямоугольных элементов находится в диапазоне 1,1...1,44. Таким образом, существует значительная неопределенность в значениях этих коэффициентов сопротивления, которые определяются в основном в лабораторных условиях на упрощенных моделях конструктивных элементов. В этом случае условия подобия для чисел Рейнольдса, Фруда и других не выполняются. Кроме того, в лабораторных условиях, обычно, не удается учесть такие важные факторы влияния реальных течений на МБУ, как сложные формы трехмерных структур, из которых состоят платформы; различные направления волнового потока; влияние зазоров между конструктивными элементами; влияние морского дна. Также имеющиеся справочные данные по аэрогидродинамике слабо обтекаемых конструкций дают сложные корреляции коэффициентов сопротивления при учете всех этих факторов [4]

Соответственно, оценки, предоставляемые внешними силами, будут неточными и неполными, ведь они не принимают во внимание необходимые факторы:

1. Изменение значений в поле естественной волновых течений, в их взаимодействии со структурой платформы;
2. Комплекс (в общем случае нелинейный) связи между гидродинамическими силами волн и их характеристик, их направления распространения, структурные особенности.

Все это вызывает значительную неопределенность и часто неточные расчеты гидродинамических нагрузок и кренящих моментов, действующих на платформе.

В наше время известно большое количество работ, посвященных теоретическим и численным исследованиям структуры вязкой жидкости при обтекании различных препятствий. Однако, эту проблему нельзя отнести к числу решенных, поскольку в режиме турбу-

лентного потока ( $Re \gg 10^3$ ) Решение основных гидродинамических уравнений становится нестабильным даже при относительно небольшой вычислительной сетки и небольшого временного шага.

Решение зависящих от времени задач, связанных с взаимодействием различных потоков с обтекаемыми объектами путем усреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу, в которых эффекты турбулентного потока считаются крупномасштабными параметрами или зависящими от времени эффектами. Таким образом, существует хорошо известная проблема параметризация тензора напряжения подсети. В простейшем случае при использовании гипотезы Буссинеска, согласно которой тензор градиента выражается в терминах усредненных компонент скорости потока и значении константы — коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_t$ .

Это позволяет формально заменить кинематическую константу вязкости  $\mu_t$ , которая по существу неоднозначным и, как правило, выбирает из условий для получения стабильного решения с заданными граничными условиями и временным шагом вычислительной сетки.

Одной из современных программ для расчета гидродинамической нагрузки является пакет COSMOSFloWorks. Прежде всего, COSMOSFloWork является удобным инструментом в руках инженера для оценки аэродинамических процессов. Система полностью интегрирована в платформу SolidWork параметрического проектирования, тем самым создавая трехмерную модель 1: 1, а не пересчитать воздействие сил с учетом масштаба.

С точки зрения технологии COSMOSFloWork имеет основные технические аспекты, основой которых является использование прямоугольной сетки, которая произвольно пересекает поверхность модели, созданной в системе графического проектирования. Такой подход дает преимущество технологии EFD (Engineering Fluid Dynamics) (многогранность, достоверность, простота использования).

При решении инженерных задач с помощью COSMOSFloWorks необходимы следующие шаги:

1. Создание 3D модели необходимого вам сооружения. Трехмерная модель может быть создана на основе SolidWorks или импортированные в одном из поддерживаемых форматов файлов;
2. Создание проекта. При создании трехмерной модели проекта импортируется в вычислительное COSMOSFloWorks доменов, единицы измерения системы для дальнейших расчетов.
3. Установка граничных и начальных условий, с учетом плотности рабочей среды, начальная скорость потока, под действием силы тяжести и другие определяющие параметры.
4. Регулирование расчетной сетки. Рассчитывается сетка автоматически генерируется с небольшой тонкой настройкой в области дизайна трещины, для более правильного описания потоков, происходящих в областях вблизи стенки. Шаг расчетной сетки также может быть установлен вручную.
5. Настройка размеров расчетной области. Расчетная область представляет форму параллелепипеда, длину, ширину и регулируемую высоту.
6. Управление этапом расчета. Расчет выполняется автоматически до приобретения сходимости.
7. Просмотр результатов. Результаты могут быть отображены в табличном формате для диаграмм Excel.

Трехмерное обтекание конструкции глубоководной платформы в среде Cosmosfloworks

Необходимым условием для работы с программой COSMOSFloWorks является создание математической модели, на основе которой будут все дальнейшие расчеты. Математическая модель, системы дифференциальных и / или интегральных уравнений, не имеет аналитического решения, они приводятся к дискретному виду и вычисляются в расчетной сетке. Чтобы определить подборку пространства, расчетная сетка порывает всю область вычислений, лица клеток, параллельны координатным плоскостям, в SolidWorks используется для вычисления декартовой модели. В COSMOSFloWorks используется метод конечных объемов, в центре ячеек вычисляется значение независимых переменных,

соответственно, в вычислительных узлах сетки, расчеты не производятся, описание вычислительной сетки COSMOSFloWorks, проходит в ее ячейках, а не в узлах, как в методах конечных разностей.

В итоге, расчетные ячейки сетки имеют форму параллелепипедов. Для решения внешних проблем, когда вокруг твердого тела течет жидкость, рассчитанная площадь будет автоматически построена в виде параллелепипеда, грани параллельны, декартовы ячейки, рассчитаны для координатных плоскостей, в SolidWorks, координаты модели расположены на некотором расстоянии от твердой конструкции.

Для создания вычислительной сетки начнем с построения основания сетки — она получается путем разделения пространства слоистых плоскостей. Декартовая координатная модель использует параллельные координатные плоскости. Число плоскостей, образующих базовую сетку, т.е. число ячеек данной сетки вдоль каждой из осей координат устанавливается на основе заданных точек, и меняется в процессе вычисления схемы вручную.

Поскольку грани вычислительных ячеек не аппроксимируют контакт с поверхностью жидкости, твердых тел, к расчетной сетке разрешения относительно небольших геометрических характеристик этих поверхностей (участки с большой криволинейностью, выступы, впадины, отверстие, поверхность, тонкие тела, окружены жидкостью, и т.п.) использовал процедуру дробления соответствующей локальной ячейки сетки вокруг тех участков поверхностей перед расчетом. На границе раздела с жидкостью, каждая ячейка базовой сетки, поделена на 8 одинаковых, геометрически похожих, меньших по размеру ячеек (они называются дочерние COSMOSWorks). При получении неудовлетворительного результата дробления, эти 8 ячеек, являются частичными, и таким же образом делятся на 8 еще более мелких ячеек, и т.д., до получения нужного критерия дробления, но не более чем до достижения размера, в 27 раз меньшего базовой ячейки.

В COSMOSFloWorks движение жидкости определяется с помощью уравнений Навье — Стокса, описывающих закон сохранения массы, импульса и энергии среды. Помимо этого, используется уравнение состояния жидкости компонентов, эмпирическую зависимость вязкости, а также теплопроводность этих компонентов от температуры окружающей среды. Эти уравнения моделируют переходный, ламинарный и турбулентный поток, который определяется критическими числами Рейнольдса. Уравнение Навье — Стокса усредняются по Рейнольдсу, для определения турбулентных потоков, т.е. За малый промежуток времени используется

среднее значения, от значений потока зависит масштаб турбулентности, а также более крупные временные изменения. Динамические условия потока (давление, скорость, температура) работают после введения производных по времени. В итоге уравнение имеет дополнительный член — б напряжение по Рейнольдсу. Для замыкания этой системы уравнений в COSMOSFloWorks используется уравнение переноса кинетической энергии, турбулентности и ее диссипации в пределах к-ε модели турбулентности.

В нестационарных пространственных декартовых координатах используется система уравнений сохранения массы, импульса и потока энергии (XI, I = 1,2,3) которая принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \cdot u_k) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \cdot u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho \cdot E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H \quad (4)$$

где  $t$  — время,  $u$  — скорость жидкости,  $\rho$  — плотность,  $P$  — давление,  $S_i$  — внешние массовые силы, действующие на единицу массы жидкости:  $S_{iporous}$  — действие сопротивления пористого тела,  $S_{igravity}$  — действие силы тяжести,  $S_{irotation}$  — операция поворота системы координат, т.  $S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation}$ ;  $E$  — полная энергия на единицу массы жидкости,  $Q_H$  — тепло, генерируемое источником тепла в единице объема жидкости,  $\tau_{ик}$  — тензор напряжения сдвига,  $q_i$  — диффузионные индексы теплового потока, означающие суммирование трех координат.

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  и диссипации энергии на единицу объема  $\epsilon$  определяются путем решения следующих уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k,$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right) + S_\epsilon, \quad (5)$$

Где:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_l P_B,$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_B P_B \right) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

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

$g_i$  — составляющая гравитационного ускорения в направлении координат  $x_i$ ,

$\sigma_B = 0,9, CB = 1$  при  $PB > 0$  и  $CB = 0$  при  $PB \leq 0$

$$f_1 = 1 + \left( \frac{0,05}{f_\mu} \right), f_1 = 1 - \exp(-R_T^2), C_{\text{содин}} = 1,44,$$

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

Ламинарные возмущения в слоевом течении на поверхности твердых тел и переходе от ламинарного к хаотическому пограничному слою, и наоборот, в хаотическом, ламинарный, смоделированный с высокой точностью, при использовании модифицированной универсальных функций стенки.

Решение уравнений (2–4) выполняется для заданных граничных условий. Общая схема дизайна решения краевой задачи показана на рисунке 1. Оси образуют декартову систему, в которой ось  $ox$  направлен вдоль диаметральной плоскости платформы, ось  $oy$  — в поперечном направлении к этой плоскости, ось  $oz$  — вертикально вверх от поверхности моря.

**Граничные условия**

1. Профиль скорости потока установившегося  $u_s(z)$  определяется в соответствии с моделью пограничного слоя Прандтля  $u_s(z)$ :

в  $z \geq \Delta$  а также  $u_s(z) = U_s [ (H - z) / \Delta ]^{1/7}$ ; в  $-H \leq z \leq -H + \Delta$  где  $\Delta$  — толщина пограничного слоя дна равна:

$$\Delta = [0.045 \frac{U_p}{f} (\frac{\nu_m}{U_p})^{0.25}]^{0.8}, \tag{4.7}$$

где  $f$  — параметр Кориолиса;  $\nu_m = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  — молекулярная вязкость.

2. От внешнего (вход) Flow  $L_{y1}$  дали профиль с током волн скорость потенциал равен

$$F(x, y, z, t) = \frac{\omega a c h [k(H + z)]}{k s h(kH)} \cos(\omega t - kx \cos \alpha - ky \sin \alpha) \tag{4.8}$$

где  $\omega = 2\pi / T$  — круговая частота волны колебаний рад/с;  $T$  — период волновых колебаний, с;  $k = 2\pi / \lambda$  — волновое число, рад/м;  $H$  — глубина моря, м;  $a$  — амплитуда волны, м;  $\alpha$  — угол между продольной осью платформы  $ox$  и направление распространения волн.

На поверхности моря определяются линеаризованным динамическим состоянием:

$$\omega^2 w + g \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{4.9}$$

где  $w$  — вертикальная скорость волны, м/с;  $\omega = 2\pi / T$  — круговая частота волны колебаний рад/с;  $g$  — ускорение силы тяжести в м/с<sup>2</sup>.

3. Находится геометрия сооружения и связанная с ней система декартовых координат.

4. Из исходящего потока задается условие Зоммерфельда или состояний непризнанных возмущений типа

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C \frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

где  $C$  — средняя скорость распространения возмущений (скорости потока, фазовая скорость поверхностной волны).

Для решения этой проблемы также должны быть начальные условия. В этом случае, в начальный момент времени задается равномерный поток при постоянной скорости потока профиля волны, а также принимая во внимание турбулентный поток, интенсивность турбулентности определяется  $I_t$  и смешанный путь  $l_p$ . Эти параметры могут быть установлены «По умолчанию», затем автоматическая регулировка процесса решения задачи. В некоторых случаях они могут быть вычислены в результате пограничного слоя уравнения решения для конкретных габаритов обтекаемой конструкции.

Числовое решение задачи определяется методом конечного объема, в котором среднее значение объемов клеток и значения отнесенные к его центру определяются как цифровое решение.

Вертикальные цилиндрические опоры широко применяются при разработке шельфа, а также для исследования динамики организации дна под действием направления морских волн и течений в контролируемых лабораторных условиях. В работе представлены результаты численного трехмерного гидродинамического расчета поля скорости при обтекании вертикальной опоры (в форме кругового цилиндра) океанической установки *постоянным течением*, а также определены характеристик эрозии грунта вблизи опоры. Расчетная схема обтекания цилиндра представлена на рисунке 2.

Для решения трехмерной нестационарной задачи задаются размеры расчетной области по осям  $ox, oy, oz$ , которые в 10...15 раз превышают размеры обтекаемого цилиндра.

Граничные условия определяются по следующим пунктам:

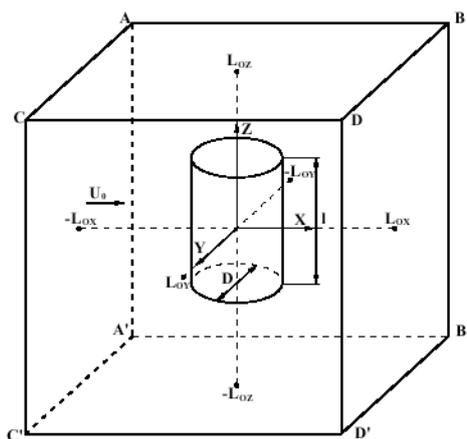


Рис. 2. Расчетная схема обтекания вертикального цилиндра

1. Определяется геометрия обтекаемого цилиндра — его координаты в системе. Условия прилипания задаются на твердой поверхности объекта.
2. На граничных плоскостях  $AA'CC'$ ,  $ABCD$  и  $A'D'C'B'$  задается непрерывная скорость течения  $u_l = U_0$  (вдоль оси  $ox$ ).
3. На границе утекающего потока (плоскость  $BB'DD'$ ) задается радиационное условие Зоммерфельда для нормальных составляющих скорости.

## Выводы

Этот программный комплекс проявляет свою эффективность в предсказании эрозии почв при соответствующих гидродинамических условиях. Были

приведены параметры материалов и особенности обтекаемых объектов для избежания несчастных случаев связанными с океанотехническими сооружениями или уклонами. Также предложены принятия различных мер безопасности на суше.

Результат исследования говорит, что максимальное количество эрозии почвы при постоянном течении может достигать 1.5 метра. Так как потоки течений не идентичны, а переменчивы система учитывает такие отклонения путем приобретения текущих данных затрат из производственных зон целесообразных измерений, включая данные наземного зондирования земли. Перспективами дальнейших исследований является использование программно-аппаратного комплекса для расчета свойств устойчивости океанических структур на мелководье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кушнир, В.М. влияние морской среды на системы освоения шельфа: монография / В. М. Кушнир, В. Р. Душко. FROM.IN Федоров. — Севастополь: СевНТУ, 2009—303.
2. Рулунд А. численное и экспериментальное исследование течения и размыва вокруг круглой сваи / А. Рулунд, Б. М. Лето, Дж. Фредсо, Дж. Михельсен // флюидная механика. — 2005. — т. 534. — Р. 351—401.
3. Морские прогнозы / W.ТО Абузяров [и др.]. —Л.: Гидрометеиздат 1988. — 319 С.
4. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике /Алямовский. Н. Н. Собачкин Е. Б. Одинцов. Н. И. Харитонович, Х. Б. Пономарев. — СПб.: БХВ — Петербург 2005. — 800 С.

© Душко Вероника Ростиславовна (VRDushko@sevsu.ru), Худяков Егор Сергеевич (ESHudyakov@sevsu.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»