

СТРУКТУРА ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ОПОРНЫХ КОЛОНН ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОГО БУРЕНИЯ

А.И. Хомич, В.Р. Душко

Севастопольский национальный
технический университет
г. Севастополь, ул. Гоголя, 23

E-mail: aleksa_06@mail.ru

Выполнен анализ структуры полей скорости течения и давления при обтекании стационарным потоком опорных колонн глубоководной платформы на основе численного трехмерного расчета.

Введение. Для освоения глубоководных месторождений Черного моря, перспективного в плане добычи газогидратных залежей на глубинах до 2 км, необходимы специальные глубоководные платформы, конструкция которых должна обеспечивать надежное их удержание над точкой бурения при различных силовых воздействиях. Такие платформы являются разновидностью полупогружных буровых установок с вертикальными анкерными тягами, тип которых получил аббревиатуру TLP. В процессе эксплуатации стабильность пространственного положения платформы обеспечивается якорной и динамической системами позиционирования, а также установленными системами автоматического контроля смещения буровой платформы. При проектировании таких систем необходимы данные о воздействии экстремальных нагрузок от морских волн и течений на элементы конструкции платформ во избежание аварийных ситуаций и потери платформ безвозвратно. Получение этих данных предусматривает детальные исследования гидродинамики платформ, создание численных моделей их динамики для определения возможных экстремальных нагрузок на элементы конструкций. Настоящая работа посвящена анализу структуры полей скорости течения и давления при обтекании опорных колонн TLP платформы стационарным потоком на основе разработанной численной схемы.

Постановка задачи. В настоящее время создаются относительно сложные пакеты прикладных программ для пространственных гидродинамических расчетов, в которых предусматривается использование различных LES методов. К их числу относится прикладной пакет COSMOSFloWorks. В этом прикладном пакете используется осреднение уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу, причем турбулентные эффекты рассматриваются как параметры течения или крупномасштабные время-зависимые эффекты.

Расчет пространственного распределения составляющих скорости течения u_k , $k = 1, 2, 3$ несжимаемой вязкой жидкости, при обтекании препятствия в виде твердого тела, выполняется в соответствии со следующими уравнениями [1]:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i - \frac{1}{\rho} \tau_{jk}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} [(E + \frac{p}{\rho}) u_k - \frac{\tau_{jk} u_j}{\rho}] = S_k u_k, \quad (3)$$

где S_i – распределенные внешние силы, отнесенные к единице массы; E – общая энергия, отнесенная к единице массы, m^2/c^2 ;

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

где $\mu = \mu_l + \mu_t$ – тензор вязких сдвиговых напряжений; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$);

μ_l – коэффициент динамической вязкости, кг/мс; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, кг/мс; k – кинетическая энергия турбулентности, m^2/c^2 ; p – давление, Па; ρ – плотность воды, kg/m^3 .

Нижние индексы в приведенных соотношениях соответствуют осям пространственной декартовой системы координат.

Для замыкания системы уравнений используются транспортные уравнения для кинетической энергии турбулентно-

сти и скорости ее диссипации в единице объема. Наиболее физически обоснованный метод – это $k-\varepsilon$ модель турбулентности, так как в его основе участвует баланс турбулентной энергии и скорости ее диссипации, кроме этого эта модель неоднократно проверена экспериментально (поэтому в ней появляются эмпирические коэффициенты).

В соответствии с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности, μ_t определяется через величины кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации этой энергии [2]:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где y – расстояние от твердой поверхности стенки. Функция f_μ позволяет учесть переход от ламинарного движения в турбулентное.

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения следующих двух уравнений [3]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + S_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + S_\varepsilon, \quad (6)$$

где $S_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_R$;

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_R P_R \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k},$$

где τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений, Н/м²; ρ – плотность воды, кг/м³; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности в единицу объема, м²/с³; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, кг/мс;

$$P_R = - \frac{g_i}{\sigma_R} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

где g_i – составляющая гравитации по оси x_i , м/с²; $\sigma_R = 0,9$ $C_R = 1$ при $P_R > 0$, $C_R = 0$ при $P_R \leq 0$;

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3; \quad f_2 = 1 \exp(-R_T^2);$$

$C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 0,9$ – эмпирические коэффициенты [3].

Решение уравнений (1) – (3) выполняется при заданных граничных условиях. Общая расчетная схема решения задачи обтекания опорных колонн глубоководной платформы показана на рис. 1. Оси координат образуют декартову систему, в которой ось ox направлена вдоль диаметральной плоскости платформы, ось oy – поперек этой плоскости, ось oz – вертикально вверх от поверхности моря.

Граничные условия.

1. Профиль скорости стационарного течения $u_x(z)$ задается в соответствии с моделью Прандтля для пограничного слоя $u_x(z) = U_x$;

$$\text{при } z \geq \Delta \text{ и } u_x(z) = U_x [(H - z)/\Delta]^{1/7};$$

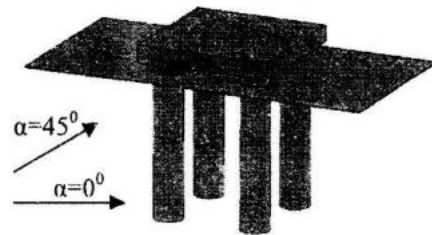
$$\text{при } -H \leq z \leq -H + \Delta,$$

где Δ – толщина придонного пограничного слоя, равная:

$$\Delta = \left[0,045 \frac{U_\rho}{f} \left(\frac{\nu_m}{U_\rho} \right)^{0,25} \right]^{0,8}, \quad (7)$$

где f – параметр Кориолиса; $\nu_m = 1,4^*$

* 10^{-6} м²/с – молекулярная вязкость.



Р и с. 1. Расчетная схема обтекания опорных колонн TLP платформы стационарным потоком

2. Определяется геометрия платформы и связанная с ней система прямоугольных декартовых координат. На поверхности конструкции и на дне моря задается условие прилипания (составляющие вектора скорости течения равны нулю, т.е. $u = v = w = 0$).

Для решения задачи необходимо также задание начальных условий. В рассматриваемом случае в начальный момент времени задается однородный поток с постоянной скоростью, а также, учитывая турбулентный характер течения, задаются интенсивность турбулентности I_t и путь перемешивания l_p .

В процессе решения автоматически определяется размер шага сетки и величина турбулентной вязкости μ . Эти параметры являются переменными, вблизи конструктивных элементов размер сетки уменьшается, а величина μ увеличивается. Базовая расчетная сетка задается в виде равномерно распределенных прямоугольных ячеек, количество которых определяется размерами расчетной области и обтекаемого объекта. При выполнении расчета производится анализ градиентов физических параметров в соседних ячейках и, если эти градиенты больше заданной величины, эти базовые ячейки дробятся на ячейки меньших размеров. При каждом дроблении базовая ячейка делится на 8 частей, предусматривается до 7 таких дроблений. Выполняется также процедура совмещения ячеек, если градиенты становятся меньше определенных величин. Таким образом, расчетная сетка является адаптивной и изменяется в процессе расчета таким образом, что в зонах наибольших перепадов физических параметров ячейки имеют минимальные размеры.

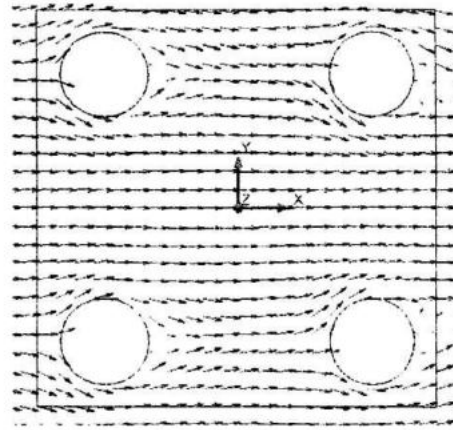
Численное решение задачи выполняется методом конечных объемов, при котором дискретные решения определяются как среднее значение по объему ячейки и эти значения приписываются ее центру.

Результаты. Для численного решения задачи обтекания опорных колонн платформы приняты следующие размеры расчетной области:

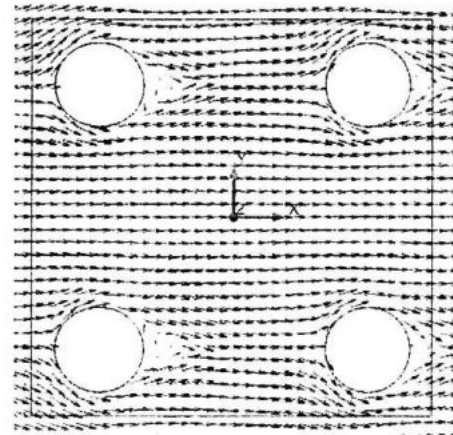
$$L_{x1} = L_{x2} = 200 \text{ м}, \quad L_{y1} = L_{y2} = 150 \text{ м},$$

$H = 500$ м. Центр координат находится на поверхности моря, в центре расчетной области, направление обтекания колонн относительно корпуса платформы $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ (см. рис. 1). При выполнении численных расчетов задавался профиль скорости течения, соответствующий скорости штормового ветра 20 м/с.

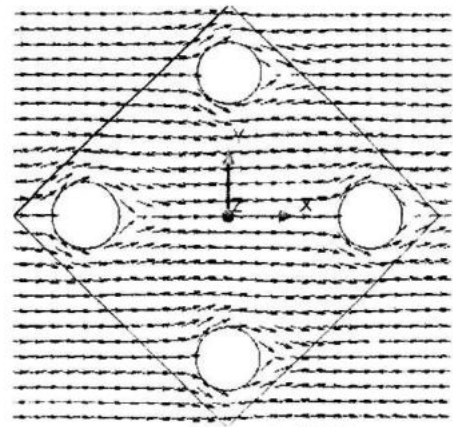
На рис. 2 – 8 представлены результаты численных расчетов полей скорости течения и давления при различных углах направления обтекания.



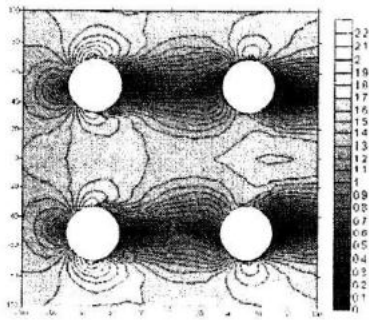
Р и с. 2. Результаты численного расчета поля скорости течения в векторном виде при $H = 10$ м и угле обтекания $\alpha = 0^\circ$



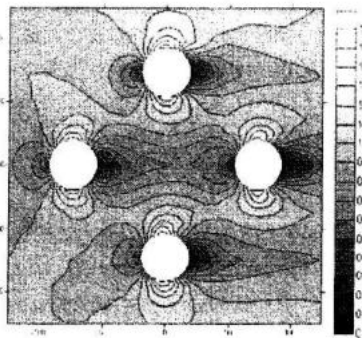
Р и с. 3. Результаты численного расчета поля скорости течения в векторном виде при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 0^\circ$



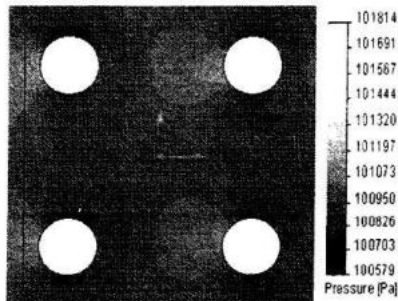
Р и с. 4. Результаты численного расчета поля скорости течения в векторном виде при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 45^\circ$



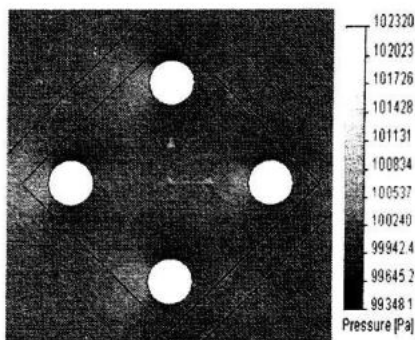
Р и с. 5. Результаты численного расчета поля скорости течения при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 0^\circ$



Р и с. 6. Результаты численного расчета поля скорости течения при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 45^\circ$



Р и с. 7. Результаты численного расчета поля давления при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 0^\circ$



Р и с. 8. Результаты численного расчета поля давления при $H = 80$ м и угле обтекания $\alpha = 45^\circ$

Выводы.

1. Гидродинамический расчет обтекания опорных колонн ТЛР платформы стационарным потоком при штормовой скорости ветра 20 м/с, показал следующее: при $\alpha = 0^\circ$ и $H = 10$ м скорость течения вблизи боковых границ первого ряда колонн увеличивается до 2,1 м/с, за колоннами образуется область затенения со скоростью 0 – 0,1 м/с, которая достигает колонн Второго ряда. При увеличении глубины $H = 80$ м структура поля скорости течения особо не изменяется, при этом скорость течения увеличивается до 1,7 м/с при фоновом значении 1,5 м/с. При $\alpha = 45^\circ$ вблизи боковых поверхностей опорных колонн формируются чередующиеся области уменьшения и увеличения скорости течения 0,1 – 1,6 м/с. За колоннами также формируются зоны затенения, со скоростью 0,1 м/с. Вблизи поверхности моря скорость течения увеличивается и достигает значений 1,1 – 1,2 м/с при фоновой величине 1 м/с.

2. Результаты расчетов показали, что наблюдаются значительные неоднородности естественного волнового поля $p(x, y, z)$, обусловленные взаимодействием конструкции опорных колонн с фоновым полем постоянных скоростей. Это проявляется в формировании зон увеличения и уменьшения давления с характерными перепадами 300 – 400 Па.

3. Представленная схема расчета может быть использована при дальнейшем изучении взаимодействия волновых и стационарных течений с конструктивными элементами глубоководных платформ при дополнительном задании граничных условий, а также расчетах экстремальных механических нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Solid Works*. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А.А., Собачки А.А., Одинцов А.А. и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1986. – 288 с.
3. Душко В.Р., Кушнир В.М. Характеристики воздействия поверхностных волн и течений на погружную буровую установку // Вестник СевГТУ. – Севастополь: СевГТУ, 2006. – Вып. 75. – С. 65 – 73.