

УДК 629.327

В.Р. Душко, В.М. Кушнир, проф., д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет. Студгородок,

г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН И ТЕЧЕНИЙ НА ПОГРУЖНУЮ БУРОВУЮ УСТАНОВКУ

Выполнены численные расчеты трехмерного поля скорости и давления при обтекании погружной буровой платформы волновым и стационарным течением, а также деформаций дна вследствие размыва и аккумуляции грунта вблизи основания платформы и непосредственно под ним.

Постановка проблемы. Погружные буровые установки (ПБУ) имеют относительно простую конструкцию и поэтому широко используются для проведения разведочного и эксплуатационного бурения в мелководных районах морского шельфа и в устьях рек. При их проектировании необходимо предусмотреть устойчивость установки против сдвигов под действием штормовых волн и течений. Актуальность этой проблемы обусловлена тем, что многие аспекты воздействия на ПБУ штормовых ветров, волн и течений остаются неизученными. К ним относится деформация грунта вблизи опорного основания ПБУ и, главным образом, размыв донного материала непосредственно под платформой. Если такой размыв грунта под ее основанием превышает 30 % площади, может произойти смещение платформы с повреждением скважины и бурильной колонны. Решение проблемы прогноза размыва грунта под основанием ПБУ при различных условиях связано с анализом гидродинамического взаимодействия придонных волновых и стационарных течений с опорным основанием платформы, определением турбулентных напряжений на дне и параметров переноса донного материала, а также расчетом деформаций дна вблизи основания ПБУ и под ним.

Общая проблема размыва грунта турбулентными потоками рассмотрена в [1]. Показано, что формирование придонного слоя взвешенных донных осадков под действием волновых течений в значительной степени определяется числами Шильдса (Shields numbers) и средним размером частиц донного материала. В то же время, в этой работе не рассматривается влияние препятствий на дне на структуру турбулентного потока и на профили концентрации взвешенных донных частиц.

Моделирование динамики размыва грунта под магистральным трубопроводом выполнено в [2]. На основе численного решения гидродинамических уравнений с вязкими и нелинейными членами вычислены турбулентные напряжения, которые формируются при воздействии постоянного течения на подводный трубопровод. Использована зависимость отношения

напряжений на наклонной стенке каверны и на ровном дне, равная отношению соответствующих чисел Шильдса. Показано, что при превышении критического угла между поверхностью дна и горизонтальной плоскостью начинается движение частиц в зоне размыва. Результаты моделирования в целом соответствуют нескольким экспериментальным зависимостям, полученным при обтекании трубопровода на песчаном грунте. Недостатками работы являются: а) реальные придонные течения не постоянны по глубине и на малых глубинах содержат волновую компоненту, что не учитывается в рассматриваемой работе; б) модель воспроизводит только размыв грунта, в то время как в реальных условиях области размыва чередуются с областями аккумуляции донного материала.

Задача о переносе донного материала под действием волн и течений в наиболее общем виде рассмотрена в [3]. Если глубина H намного меньше длины волны λ ($2\pi H < \lambda$), так называемое приближение «мелкой воды», характеристики поверхностных волн (средняя высота волны $h_W = 0.07 \cdot W \left(\frac{W}{g}\right) \left(\frac{g \cdot H}{W^2}\right)^{0.6}$, ее период $T_W = 18.7 \cdot \left(\frac{W}{g}\right) \left(\frac{g \cdot h_W}{W^2}\right)^{0.6}$ и длина $\lambda = T_W \sqrt{g \cdot H}$) определяются по известной полуэмпирической модели ЛО-ГОИН-Союзморниипроект. В этих соотношениях W – скорость ветра, H – глубина, g – ускорение свободного падения. Амплитуды придонной орбитальной скорости U_m и продольных колебаний частиц воды в волновом движении a_W , равные соответственно

$$U_m = \frac{\pi \cdot h_W}{T_W \cdot sh\left(\frac{2\pi \cdot H}{\lambda}\right)}, \quad a_W = \frac{U_m \cdot T_W}{2\pi},$$

определяют величину придонных турбулентных напряжений по соотношению

$$\tau_W = \rho \left(\frac{0.4 \cdot U_m}{\ln\left(1.6 \frac{a_w}{2.5 \cdot d_s + \Delta} + 1\right)} \right)^2,$$

где ρ – плотность воды, d_s – размер фракций донного материала, Δ – высота донных рифелей.

Удельный перенос донного материала q_x, q_y ($\text{м}^3/\text{с}$ на метр волнового фронта, $\text{м}^2/\text{с}$) вдоль заданных координатных осей ox, oy по модели [3] вычисляется как сумма взвешенных донных отложений, переносимых средними течениями, и движущихся непосредственно на дне частиц грунта. Так как размеры частиц донного материала d_s неодинаковы, то в [4] учитывается их характерное вероятностное распределение $W_d(d_s)$ по данным геологических исследований. Средний удельный перенос донного материала

$q_{Cx} \cdot q_{Cy}$ вдоль координатных осей ox , oy с учетом этого вероятностного распределения вычисляется по соотношению:

$$q_{Cx,y} = \int_0^{\infty} F_{x,y}(d_s) \cdot W_d(d_s) \cdot d(d_s),$$

где $F_{x,y}(d_s)$ – нелинейная зависимость удельного переноса донного материала от размеров частиц грунта d_s при различной скорости ветра и глубине моря.

Деформации дна или изменение глубины $H=f(x,y,t)$ вычисляются в результате численного решения уравнения [4]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_{Cx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{Cy}}{\partial y} \right).$$

Модель [3] с учетом вероятностного распределения фракций донного материала по размерам частиц была использована для прогноза деформаций дна в зоне Усть-Лужского канала в течение года. Получено хорошее соответствие с данными непосредственных измерений за этот же период [4]. Тем не менее, в этих моделях не учитывается влияние конструкции ПБУ на дне на структуру придонного волнового и постоянного течения и, следовательно, на формирование турбулентных напряжений и удельного переноса донного материала, которые определяют деформации дна вблизи платформы.

Гидродинамическое взаимодействие волновых и стационарных течений с различными препятствиями на морском дне рассмотрено во многих публикациях [5]. В таких моделях, как правило, рассматриваются препятствия простой формы, а расчеты выполняются в двухмерной постановке. В [6] рассмотрено трехмерное обтекание сложной конструкции самоподъемной буровой установки волновым и стационарным течением, причем волновое течение рассмотрено в потенциальном приближении, что ограничивает общность полученных результатов диапазоном малых чисел Келегана-Карпентера ($K \leq 5$).

Изложенные ограничения традиционных методов прогноза деформаций дна вблизи опорного основания ПБУ с одной стороны, и развитие численных методов гидромеханики на основе использования современных ЭВМ, с другой, являются основой другого, более прогрессивного метода для решения задач указанного типа. Этот метод основан на численных расчетах турбулентного обтекания сложных конструкций на основе общих уравнений гидромеханики вязкой жидкости. Полученные результаты используются для определения турбулентных напряжений на дне, параметров переноса донного материала и прогноза размыва грунта вблизи и непосредственно под основанием ПБУ.

Метод решения. Для расчета пространственного поля скорости течения $u_k, k = 1, 2, 3$ несжимаемой вязкой жидкости при обтекании препятствия в виде твердого тела используется следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_k - \frac{1}{\rho} \tau_{ik}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} &= S_i, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}[(E + \frac{p}{\rho})u_k + \frac{q_k - \tau_{ik} u_i}{\rho}] &= S_k u_k + Q_H.\end{aligned}$$

Здесь S_i – распределенные внешние силы, отнесенные к единице массы; E – общая энергия, отнесенная к единице массы, Q_H – поток тепла на единицу объема; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений, равный $\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$, $\mu = \mu_l + \mu_t$; δ_{ij} – дельта функция Кронекера; μ_l – коэффициент динамической вязкости; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости; k – кинетическая энергия турбулентности; q_k – диффузионный поток тепла. Нижние индексы в приведенных соотношениях соответствуют осям пространственной декартовой системы координат.

При расчетах используются также следующие соотношения k – ϵ модели турбулентности: $\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\epsilon}$,

$$f_\mu = [1 - \exp(-0,025 \cdot R_y)]^2 \cdot (1 + \frac{20,5}{R_T}), \quad R_y = \frac{\rho \cdot y \cdot \sqrt{k}}{\mu_l}, \quad R_T = \frac{\rho \cdot k^2}{\mu_l \cdot \epsilon}.$$

В этих моделях y – расстояние от твердой поверхности. Функция f_μ позволяет учесть переход от ламинарного движения в турбулентное.

Используются также следующие уравнения k – ϵ модели.

$$\begin{aligned}\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_k)}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k}[(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_k}] + S_k, \\ \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_k)}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k}[(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k}] + S_\epsilon, \quad S_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B, \\ S_\epsilon &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (f_1 \cdot \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t \cdot C_B \cdot P_B) - C_{\epsilon 2} \cdot f_2 \frac{\rho \cdot \epsilon^2}{k},\end{aligned}$$

где $P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$; g_i – составляющая гравитации по оси x_i ; $\sigma_B = 0,9$,

$C_B = 1, P_B > 0$ и $C_B = 0$ во всех других случаях; $f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu}\right)^3$,

$f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$, $C_\mu = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$. $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1$,

$q_k = -\left(\frac{\mu_l}{\rho_l} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) C_p \frac{\partial T}{\partial x_k}$, $\sigma_c = 0,9$; C_p – теплоемкость воды при постоянном давлении.

Граничные условия. 1. Со стороны внешнего (входящего) потока задаются профили волнового течения с потенциалом скорости, равным

$$F(x, y, z, t) = \frac{\omega \cdot a \cdot \operatorname{ch}(k \cdot z)}{k \cdot \operatorname{sh}(k \cdot H)} \cos(\omega \cdot t - k \cdot x \cos \alpha - k \cdot y \sin \alpha),$$

где оси координат образуют декартову систему, в которой ось ox направлена вдоль диаметральной плоскости ПБУ, ось oy поперек этой плоскости, ось oz – вертикально вверх от поверхности моря, $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота волновых колебаний, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, H – глубина моря, 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

$$U_p = (-3 \cdot 10^{-5} \cdot H^2 + 0.0012 \cdot H) \cdot W + (-6 \cdot 10^{-6} \cdot H^2 + 0.0025 \cdot H),$$

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

где W – скорость ветра. Профиль скорости стационарного течения $u_s(z)$ задается в соответствии с моделью Прандтля для пограничного слоя $u_s(z) = U_s$ при $z \geq \Delta$ и $u_s(z) = U_s [(H - z)/\Delta]^{1/7}$ при $-H \leq z \leq -H + \Delta$, где Δ – толщина придонного пограничного слоя, равная [4]:

$$\Delta = \left[0.045 \frac{U_p}{f} \left(\frac{v_m}{U_p} \right)^{0.25} \right]^{0.8}.$$

Здесь 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, $W=0$ м/с, скорость дрейфового течения U_p на поверхности моря равна 0,384 м/с, толщина придонного пограничного слоя $\Delta=5,04$ м.

2. Определяется геометрия ПБУ и связанная с ним система прямоугольных декартовых координат. На поверхности ПБУ и на дне задается условие прилипания.

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

Решение краевой задачи выполняется методом конечных объемов. В процессе решения автоматически определяется размер шага сетки и величина турбулентной вязкости ν_t . Эти параметры являются переменными, вблизи конструктивных элементов размер сетки уменьшается, а величина ν_t увеличивается.

Результаты. Численные расчеты выполнены применительно к конкретной ПБУ типа «Тазов-1», созданной по проекту ЦКБ «Коралл» (г. Севастополь). Главные размерения опорного основания этой платформы таковы: длина корпуса наибольшая – 84,6 м, ширина – 24,0 м, высота борта на мидель-шпангоуте – 4,2 м. При выполнении расчетов использовались параметры поверхностных волн, соответствующие скорости штормового ветра в диапазоне от 20...40 м/с для глубины моря $H=10$ м при различных направлениях распространения волн. Один из примеров расчета поля скорости показан на рисунке 1.

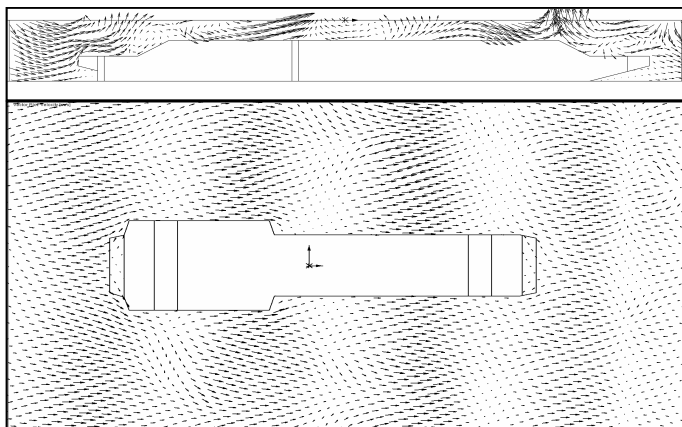


Рисунок 1 – Результаты численного расчета поля скоростей в векторном виде при $W=20$ м/с и угле распространения волн $\alpha=0^\circ$ (вид сбоку, вид сверху)

Результаты численных гидродинамических расчетов полей скорости течений при обтекании ПБУ позволили определить области размыва и аккумуляции грунта вблизи и непосредственно под опорным основанием буровой платформы при различных интервалах времени Δt . На рисунке 2 изображен характерный пример выполненных расчетов размыва донного материала для скорости ветра $W=40$ м/с при $\alpha=0^\circ$, за время 24 часа.

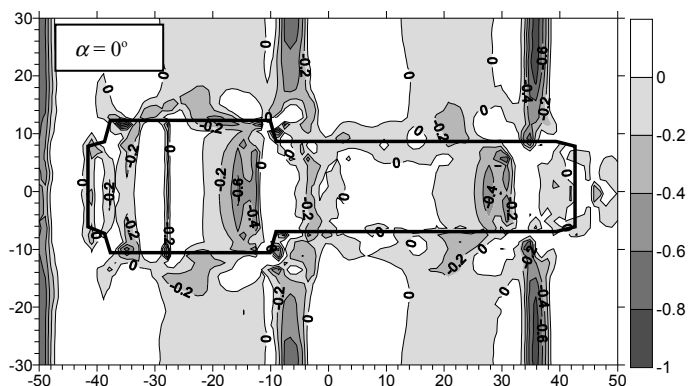


Рисунок 2 – Результаты расчета размыва дна вблизи и под опорным основанием буровой платформы при скорости ветра $W=40$ м/с

На рисунке 3 показан процесс размыва и аккумуляции песчаного грунта вдоль поперечной оси платформы у под опорным основанием ПБУ и вблизи различных его частей при изменении временного интервала Δt 6, 12, 18, 24 ч в зонах, где величина размыва является максимальной (расстояние по продольной оси платформы $x = -15$ м).

При $\alpha=45^\circ$ средняя величина размыва грунта под опорным основанием равна 0,8 м/сут, при этом площадь размыва является максимальной. При уменьшении скорости штормового ветра от 40 до 20 м/с и угле распространения волн 0° относительно опорного основания ПБУ величина размыва уменьшается примерно в 4 раза и составляет 0,2 м/сут.

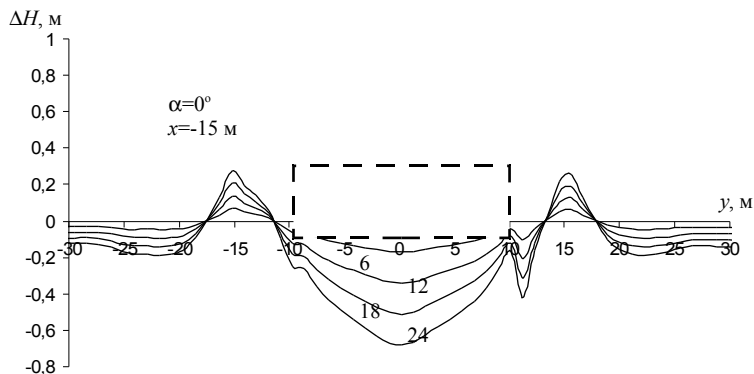


Рисунок 3 – Динамика размыва донного материала под опорным основанием ПБП при скорости ветра $W=40$ м/с, угле распространения волны $\alpha=0^\circ$ и различных временных интервалах $\Delta t=6, 12, 18$ и 24 ч

Выводы. Расчеты деформаций дна вблизи и под опорным основанием ПБУ под действием волн и течений показали, что формируется пятнистая картина чередующихся областей размыва и аккумуляции грунта с характерными размерами этих областей 5...10 м вдоль направления распространения волн и 30...50 м вдоль их гребней. Особенностью деформаций дна является сильная зависимость их характеристик от направления скорости ветра и распространения волн относительно опорного основания. Максимальный размыв грунта может достигать 1,8 м/сут при непрерывном и устойчивом по направлению ветре со скоростью 40 м/с и $\alpha=90^\circ$. В реальных условиях ветер является переменным, как по скорости, так и по направлению. Созданное программное обеспечение позволяет учесть такие вариации путем усвоения текущих данных о скорости ветра с интервалами производства гидрометеорологических измерений. При этом на каждом таком шаге задача решается с теми граничными условиями на дне, которые были получены в предыдущем расчете.

Если численные расчеты показывают возможность значительного размыва грунта, то для предотвращения потери устойчивости выполняется следующее: оснащение опорного основания платформы юбкой; создание искусственные покрытия вокруг платформы, главным образом синтетического типа; укладка мешков с гравием, ракушкой или песком; применение защитных сеток; насыпка «бермы» и постановка платформы на фундамент для слабонесущих грунтов; укрепление донного материала при помощи цементирования.

Оптимальный выбор одного из этих методов может быть выполнен на основе детальных расчетов деформаций дна, возможных в точке установки и эксплуатации платформы.

Таким образом, по существу разработан метод и программное обеспечение для прогноза размыва грунта при конкретных гидрометеорологических условиях и конструктивных параметрах платформы. Это имеет большое значение для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с наклонами и/или сдвигом ПБУ, а также позволяет определить моменты контроля реального состояния грунта вблизи опорного основания и осуществить различные мероприятия по увеличению безопасности платформы в случае необходимости.

Основные задания дальнейших исследований проблемы обеспечения устойчивости морских буровых установок, которые опираются на дно, заключаются в следующем: различные варианты моделирования поведения буровой платформы при широких вариациях внешних условий, в том числе наиболее жестких воздействиях природной среды, позволят оптимизировать конструктивные параметры платформ при гарантированном выполнении требований МРС по их устойчивости на грунте.

Библиографический список

1. Hsu T-W. Application of a $k-\epsilon$ Model to Instantaneous Sediment Concentration and Turbulent Boundary Layers of wave-Induced Shelf Flow / T-W. Hsu, H-Y. Lin // In "Flow Modeling and turbulent Measurements VII". — Taiwan, 1998. — P. 27–37.
2. Li F. Numerical Simulation of Pipeline Local Scour with Les-Wake Effects / F. Li, L. Cheng // J. of Offshore and polar Engineering. — 2000. — Vol. 10. — No. 3. — P. 195–199.
3. Иванов В.А. Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов) / В.А. Иванов, А.Е. Михинов. — Севастополь, 1991. — 51 с. (Препр. / НАН Украины. МГИ).
4. Добротворский А.Н. Диагностическая модель деформаций дна под действием гидрометеорологических факторов. / А.Н. Добротворский, С.А. Дружевский, В.М. Кушнир // Навигация и гидрография. — 2001. — № 1. — С. 94–103.
5. Huang C-C. Flow Patterns for Waves with an Uniform Current Passing through a Submerged Breakwater / C-C. Huang, Y-T. Tseng // Proceedings of 7th International Symposium of Flow Modeling and Turbulence Measurements, Taiwan. Oct. 5–8, 1998. — 1998. — P. 537–544.
6. Душко В.Р. Режим обтекания и транспорт донного материала вблизи опоры самоподъемной буровой установки / В.Р. Душко, В.М. Кушнир // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2005. — Вып. 10. — С. 377–387.

Поступила в редакцию 14.11.2005 г.