

## ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПОЛУПОГРУЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ ТИПА TLP НА ВОЛНЕНИИ

*О.А. Иванова, И.Н. Морева*

Севастопольский национальный  
технический университет  
г. Севастополь, ул. Университетская, 33

*В статье приводится расчет вертикальных колебаний полупогруженной платформы типа TLP под действием поверхностных волн, который выполняется при помощи специализированного программного обеспечения разработанного на кафедре Океанотехники и кораблестроения СевНТУ. В результате проведенного исследования определена оптимальная длина опорных колонн.*

**Введение.** Плавающие буровые установки, как правило, предназначены для эксплуатации в определенных районах континентального шельфа, которые могут заметно различаться по условиям внешней среды. Поэтому при определении характеристик платформы необходимо располагать знанием особенностей ветровых условий, а также поверхностного волнения.

Воздействие поверхностных волн на полупогруженные платформы TLP для глубоководного бурения является более сложным из-за их пространственно-временной структуры и различных гидродинамических эффектов при взаимодействии с конструктивными элементами [1].

В настоящее время при расчете конструкции морских платформ и их поведении на волнении применяется теория плоских волн. Такое приближение является вполне обоснованным, так как длина гребней штормовых волн обычно значительно превышает размеры полупогруженной платформы.

Наибольшие ограничения на использование полупогруженной платформы TLP оказывают их вертикальные перемещения. Значительная вертикальная качка может привести к повреждению буровой колонны, разрушению водоотделительной конструкции и даже устья скважины. Для обеспечения безопасности работ используется специальное оборудование, компенсирующее вертикальные перемещения. Однако этого может ока-

заться недостаточно в условиях штормовых волн. Таким образом, анализ вертикальной качки полупогруженной платформы TLP при воздействии штормовых волн относится к числу наиболее актуальных проблем использования подобных установок.

В работах по математическому моделированию колебаний полупогруженной платформы TLP используются общие уравнения качки судна на волнении с учетом конструктивных особенностей платформы [2]. На основании принципа Д'Аламбера уравнение движения для вертикальной качки можно представить в следующем виде:

$$\frac{D}{g} \ddot{\zeta}_g = P_{\zeta_{in}} + P_{\zeta_{d}} + P_{\zeta}^{(1)} + P_{\zeta}^{(2)} + P_{\zeta}^{(3)} + D,$$

где  $D$  – весовое водоизмещение;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\ddot{\zeta}_g$  – вертикальное ускорение центра тяжести ПП;  $P_{\zeta_{in}}$  – инерционная составляющая гидродинамической силы;  $P_{\zeta_{d}}$  – демпфирующая составляющая гидродинамической силы;  $P_{\zeta}^{(1)}$  – гидростатическая сила;  $P_{\zeta}^{(2)}$  – главная часть возмущающих сил;  $P_{\zeta}^{(3)}$  – дифракционные части возмущающих сил.

$$P_{\zeta_{in}} = -\mu_{\zeta\zeta} \ddot{\zeta}_g,$$

где  $\mu_{\zeta\zeta}$  – коэффициент присоединенных масс.

Коэффициент присоединенных масс  $\mu_{\zeta\zeta}$ , имеющие размерность масс, представлены в виде суммы:

$$\mu_{\zeta\zeta} = \mu_{\zeta\zeta n} + \mu_{\zeta\zeta k},$$

где  $\mu_{\zeta\zeta n}$  – присоединенная масса понтонов;  $\mu_{\zeta\zeta k}$  – присоединенная масса колонн.

Присоединенная масса колонн при вертикальных колебаниях полупогруженной платформы TLP рассчитывается по формуле:

$$\mu_{\zeta\zeta k} = 1,5\rho\pi n_k h_k \left(\frac{d_k}{2}\right)^2,$$

где  $\rho$  – массовая плотность воды;  $d_k$  – диаметр погруженных стабилизирующих колонн;  $h_k$  – высота стабилизирующих колонн;  $n_k$  – число колонн на одном понтоне.

$$\mu_{\zeta_n} = 1,5\rho\pi nL_n \left( \frac{b_n}{2} \right)^2,$$

где  $n$  – количество понтонов;  $L_n$  – длина понтона.

$$P_{\zeta_0} = -\lambda_{\zeta\zeta} \zeta_{\zeta} - W_{\zeta\zeta} \zeta_{\zeta}^2 \operatorname{sgn} \zeta_{\zeta} - \dots,$$

где  $\lambda_{ij}$ ,  $W_{ij}$  – коэффициенты демпфирования.

Гидростатическая сила определяется по формуле:

$$P_{\zeta}^{(1)} = -D - 2\gamma\zeta_{\zeta} \sum_{i=1}^n S_{ki} + 2\gamma r_n \cos k_2 a \cos \omega t \sum_{i=1}^n S_{ki} x_6 x_7 \cos k_1 l_{ki},$$

где  $r_n$  – амплитуда волны;  $S_{ki}$  – площадь поперечного сечения  $i$ -й колонны ПП;  $l_{ki}$  – отстояние  $i$ -й колонны ПП от плоскости мидель-шпангоута ( $l_{ki} > 0$ , если колонна смещена к носу);  $k_1 = k \cos \chi$ ;  $k_2 = k \sin \chi$ ,  $k$  – волновое число,  $\gamma$  – удельный вес воды,  $\zeta_{\zeta}$  – вертикальное перемещение центра тяжести ПП,  $\chi$  – угол распространения волн относительно ДП платформы,  $a$  – величина, равная половине поперечного клиренса ПП.

$$P_{\zeta}^{(2)} = P_{\zeta_n}^{(2)} + P_{\zeta_k}^{(2)};$$

$$P_{\zeta_n}^{(2)} = -2\gamma\alpha_0 e^{kz_{\alpha}} L_{np} b_n T_0 x x_1 x_2 \cos k_2 a \cos \omega t,$$

где  $\alpha_0$  – угол волнового склона;  $T_0$  – высота борта понтона;  $k$  – эмпирический коэффициент, который для ПП изменяется в пределе 0,7 – 1,0. При расчетах качки ПП рекомендуется принимать его равным 0,85.  $L_{np} = \delta \cdot L_n$  – приведенная длина ПП;  $b_n$  – ширина понтона;

$$x = \frac{\sin u}{u}; \quad x_1 = \frac{\sin u_1}{u_1}; \quad x_2 = \frac{\sin u_2}{u_2};$$

$$u_1 = \frac{kB}{2} \sin \chi; \quad u_2 = \frac{kT_0}{2}; \quad z_{\alpha} = T_k + \frac{T_0}{2};$$

$h_k$  – высота стабилизирующих колонн;  $T_k$  – осадка стабилизирующей колонны.

$$P_{\zeta_k}^{(2)} = -2\gamma\alpha_0 P_{\zeta_k}^{(21)} \cos k_2 a \cos \omega t;$$

$$P_{\zeta_k}^{(21)} = \sum_{i=1}^n V_{ki} x_6 x_7 x_9 \cos k_1 l_{ki},$$

где  $V_{ki}$  – объем  $i$ -й колонны ПП;

$$x_6 = \frac{\sin u_3}{u_3}; \quad x_7 = \frac{\sin u_4}{u_4}; \quad u_3 = \frac{kd_i}{2} \cos \chi;$$

$$x_9 = \frac{1 - \exp(-u_5)}{u_5}; \quad u_4 = \frac{kb_i}{2} \sin \chi; \quad u_5 = kT_k;$$

$$z_{\alpha} = T_k + \frac{T_0}{2}, \quad d_i - \text{диаметр } i\text{-й колонны};$$

$$b_i = 0,785 d_i.$$

Дифракционная часть возмущающих сил определяется по формуле:

$$P_{\zeta}^{(3)} = -2\mu_{\zeta_n} \omega^2 r_n \exp(-kz_{0i}) x x_1 x_2 \cos k_2 a \cos \omega t$$

Просуммировав проекции гидродинамических сил получаем уравнение вида:

$$\zeta_{\zeta} + 2\nu_{\zeta}(\zeta_{\zeta}) \zeta_{\zeta} + n_{\zeta}^2 \zeta_{\zeta} = r_n x_{\zeta}^{(1)} \cos \omega t,$$

$$\text{где } 2\nu_{\zeta}(\zeta_{\zeta}) = \frac{\lambda_{\zeta\zeta} + W_{\zeta\zeta} \zeta_{\zeta} \operatorname{sgn} \zeta_{\zeta} + \dots}{\frac{D}{g} + \mu_{\zeta}};$$

$$n_{\zeta}^2 = \frac{2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki}}{\frac{D}{g} + \mu_{\zeta}}; \quad x_{\zeta}^{(1)} = \frac{2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} x_{\zeta}}{\frac{D}{g} + \mu_{\zeta}};$$

$$x_{\zeta} = \left( -x_{\zeta_n}^{(1)} + x_{\zeta_k}^{(1)} + x_{\zeta_n}^{(2)} \right) \cos k_2 a;$$

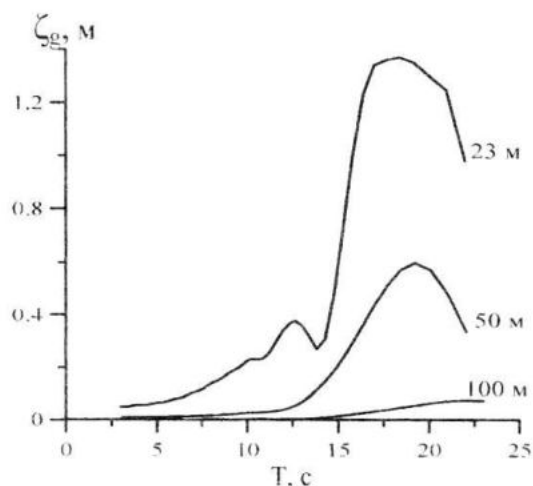
$$x_{\zeta_n}^{(1)} = \frac{kV_n}{\sum_{i=1}^n S_{ki}} x x_1 x_2 \exp(-kz_{\alpha});$$

$$x_{\zeta_k}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ki} x_6 x_7 \cos k_1 l_{ki}}{\sum_{i=1}^n S_{ki}} \frac{k \sum_{i=1}^n V_{ki} x_6 x_7 x_9 \cos k_1 l_{ki}}{\sum_{i=1}^n S_{ki}};$$

$$x_{\zeta_n}^{(2)} = \frac{-k\mu_{\zeta_n}}{\rho \sum_{i=1}^n S_{ki}} x x_1 x_2 \exp(-kz_{\alpha}).$$

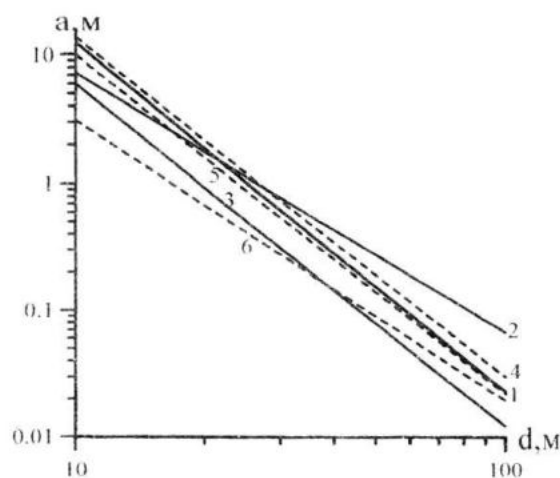
Для численного решения уравнения вертикальных колебаний были использованы следующие данные реальной полупогружной платформы ГЛР: водоизмещение  $D=56331 \text{ м}^3$ ; длина понтона  $L_n=100 \text{ м}$ ; ширина понтона  $b_n=15 \text{ м}$ ; высота понтона  $H_n=9 \text{ м}$ ; диаметр стабилизирующих колонн  $d_k=15 \text{ м}$ ; высота стабилизирующих колонн  $h_k=24 \text{ м}$ ; число колонн  $n=4$ ; осадка эксплуатационная  $d=23 \text{ м}$ . Эти параметры платформы ГЛР были использованы для расчетов амплитуды вертикальной качки без учета нелинейного члена уравнения и при следующих исходных данных:  $r_n$  – амплитуда волны (5 м);  $t_{ш}$  – время шторма (36000 с);  $x$  – длина разгона (200000 м).

Расчеты проводились при различных углах распространения волн ( $\chi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ), относительно продольной плоскости платформы. В виде примера на рис. 1 представлены результаты расчетов для  $\chi = 0^\circ$ . Кривые, приведенные на рис. 1, позволяют проанализировать влияние длины опорных колонн, так как хорошо виден эффект их стабилизации: амплитуда вертикальных перемещений в 13 раз меньше при осадке 100 м, чем при осадке 23 м.



Р и с. 1. Вертикальная качка,  $\chi=0^\circ$ , осадка 23 м, 50 м, 100 м

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды вертикальных перемещений от осадки платформы, с учетом линейных и нелинейных членов демпфирования при различном угле распространения волн (пунктирная линия – с учетом нелинейных членов, сплошная – без учета нелинейных членов).



Р и с. 2. Зависимость амплитуды вертикальных перемещений от осадки платформы

Расчеты выполнены без учета нелинейных членов демпфирования:

1 – вертикальные перемещения при  $\chi = 0^\circ$ ; 2 – вертикальные перемещения при  $\chi = 45^\circ$ ; 3 – вертикальные перемещения при  $\chi = 90^\circ$ .

Расчеты выполнены с учетом нелинейных членов демпфирования:

4 – вертикальные перемещения при  $\chi = 0^\circ$ ; 5 – вертикальные перемещения при  $\chi = 45^\circ$ ; 6 – вертикальные перемещения при  $\chi = 90^\circ$ .

Из рис. 2 видно, что с увеличением осадки платформы амплитуда вертикальных перемещений уменьшается. В результате расчетов было выявлено, что для TLP платформы с заданными главными размерениями, оптимальной является осадка 35 – 40 метров.

**Заключение.** Состояние рассмотренной в статье проблемы характеризуется актуальной для Украины задачей конструирования современных полупогружных платформ и безопасной эксплуатации существующих установок. При анализе вертикальной качки с учетом нелинейных членов демпфирования для полупогружной буровой платформы типа TLP было установлено, что при увеличении осадки платформы уменьшается амплитуда вертикальных перемещений. При реальных параметрах буровой и реальных экстремальных характеристиках морского волнения был выявлен эффект стабилизации платформы при осадке 35 – 40 метров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морева И.Н. Особенности колебаний морских полупогружных платформ при воздействии штормовых волн / И.Н. Морева // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь, 2006. – Вып. 3(19). – С. 152 – 161.
2. Морева И.Н. Нелинейные колебания полупогружных морских платформ / И.Н. Морева, В.М. Кушнир, Ю.Г. Ожиганов // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Севастополь, 2007. – Вып. 1(21). – С. 144 – 149.