

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

УДК: 622.242 629.124

И.Н. Морева, аспирант,

В.М. Кушнир, проф., д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

root@sevgtu.sebastopol.ua

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ МОРСКОЙ ПОЛУПОГРУЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Выполнен анализ вертикальных колебаний полупогружных морских платформ (ПМП) с учетом нелинейных членов уравнения качки при воздействии поверхностных волн различной высоты.

Полупогружные морские платформы (ПМП) широко используются в качестве современных средств океанотехники: это плавучие буровые установки для разведочного и эксплуатационного бурения нефтяных и газовых скважин на шельфе, новые типы плавучих кранов большой грузоподъемности, средства для производства особо сложных водолазных и судоподъемных работ.

Эксплуатационные расходы, связанные с использованием ПМП, относительно велики и состоят из многих составляющих. Наиболее существенная из них определяется простоями при плохой погоде. Продолжительность таких периодов является основным критерием, определяющим экономическую эффективность ПМП. В связи с этим проблема воздействия поверхностных волн на ПМП в части обеспечения ее стабильности имеет высокую актуальность для проектирования новых типов платформ, повышение безопасности и экономической эффективности их эксплуатации в наиболее суровых гидрометеорологических условиях.

Эти факторы подтверждают необходимость проведения исследований воздействия поверхностных волн на платформы с целью определений их вертикальных и угловых колебаний при различных конструктивных параметрах и характеристиках ветрового режима.

Воздействие поверхностных волн на платформы является сложным явлением из-за их пространственно-временной структуры и различных гидродинамических эффектов при взаимодействии с конструктивными элементами. Обычно платформы полупогружного типа имеют размеры, которые сопоставимы с длиной волны, поэтому при взаимодействии с ней могут появиться некоторые волновые эффекты: дифракция, рефракция, а также резонансное увеличение амплитуды угловых и вертикальных колебаний. Резонансные эффекты особенно важно учитывать, так как кроме дестаби-

лизации платформы они приводят к увеличению механических напряжений на элементы конструкции.

В работах по математическому моделированию колебаний ПМП используются общие уравнения качки судна на волнении с учетом конструктивных особенностей платформы [1, 2]. В общем виде эти уравнения являются нелинейными и неоднородными, а для получения решений используют различные методы их линеаризации или просто пренебрегают нелинейными членами. При этом возможны значительные искажения из-за неточного учета нелинейных членов демпфирования колебаний при воздействии поверхностных волн большой амплитуды. В связи с этим, целью настоящей работы является оценка влияния нелинейных членов демпфирования на параметры вертикальных колебаний платформы.

Общее уравнение вертикальных колебаний ПМП на основе баланса сил инерции, демпфирования и плавучести имеет следующий вид [1, 3]:

$$\left(\frac{D}{g} + \mu_{\xi} \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + A_{1\xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + A_{2\xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \left| \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| + A_{3\xi} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^3 + 2\gamma \xi \sum_{i=1}^n S_{ki} = 2a_{wz} \gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \chi_{\xi} \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

В этом уравнении D – весовое водоизмещение платформы, g – ускорение силы тяжести ($9,81 \text{ м/с}^2$), μ_{ξ} – присоединенные массы, ξ – вертикальные колебания центра тяжести ПМП, $A_{1\xi}$, $A_{2\xi}$, $A_{3\xi}$ – коэффициенты демпфирования колебаний, γ – объемный вес воды, n – число стабилизирующих колонн с одного борта, S_{ki} – площадь i -ой колонны, a_{wz} – амплитуда волны на глубине z , где устанавливаются стабилизирующие понтоны. Величина a_{wz} определяется по соотношению для линейных волн $a_{wz} = a_{w0} \exp(-2\pi/\lambda)$, где a_{w0} – амплитуда волн на поверхности моря; λ – длина волны ($\lambda=1,56T^2$); χ_{ξ} – коэффициент, характеризующий воздействие гидростатических сил и моментов по гипотезе А.Н. Крылова о дифракционной части возмущающих сил и моментов, ω – угловая частота поверхностных волн. Решение уравнения (1) для вынужденных колебаний:

$$\xi(t) = A_{\xi} \cos \omega t, \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\omega A_{\xi} \sin \omega t, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\omega^2 A_{\xi} \cos \omega t. \quad (2)$$

Подставляя производные (2) в уравнение (1) и опуская вначале нелинейные члены, находим:

$$A_{\xi} = \frac{\left(2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \chi_{\xi} \right) \cdot a_{wz}}{\sqrt{\left(A_{1\xi} \omega \right)^2 + \left(\left(2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \right) - \left(\frac{D}{g} + \mu_{\xi} \right) \omega^2 \right)^2}}.$$

Для учета нелинейных членов рассмотрим соотношения

$$A_{2\zeta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \left| \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| = -\omega^2 A_{\zeta}^2 A_{2\zeta} \sin \omega t |\sin \omega t| = -\omega^2 A_{\zeta}^2 A_{2\zeta} \sum_{i=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t),$$

где b_i – коэффициенты ряда Фурье:

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{0.5T} f(x) \sin n\omega x dx, \quad (3)$$

$$\text{где } f(x) = A_{2\zeta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \left| \frac{\partial \xi}{\partial t} \right|, \text{ при } 0 < x < \frac{\pi}{\omega} \quad f(x) = A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 \sin^2 \omega x.$$

После подстановки $f(x)$ в (3) получаем:

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{0.5T} A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 \sin^2 \omega x \sin n\omega x dx. \quad (4)$$

После упрощения выражение (4) имеет вид:

$$b_n = \frac{A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 \sin^2 \frac{n\pi}{2}}{\frac{n}{2} \left(1 - \frac{n^2}{4} \right) \pi}.$$

Амплитуды первой, третьей и пятой гармоник равны соответственно:

$$b_1 = \frac{A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 8}{3\pi}, \quad b_3 = -\frac{A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 8}{15\pi}, \quad b_5 = -\frac{A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 8}{105\pi}.$$

Общее уравнение вертикальных колебаний ПМП на частоте первой гармоники определяется с учетом следующих соотношений:

$$A_{2\zeta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right) \left| \frac{\partial \xi}{\partial t} \right| = \frac{A_{2\zeta} A_{\zeta}^2 \omega^2 8}{3\pi} \sin \omega t, \quad (5)$$

$$A_{3\zeta} \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)^3 = -A_{3\zeta} A_{\zeta}^3 \omega^3 \sin^3 \omega t = -\frac{3A_{3\zeta} A_{\zeta}^3 \omega^3}{4} \sin \omega t.$$

Подставляя соотношения (5) в (1), находим:

$$A_{\xi} = \frac{\left(2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \lambda_{\xi} \right) \cdot a_{wz} \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}}{\left(2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \right) - \left(\frac{D}{g} + \mu_{\xi} \right) \omega^2},$$

$$\sin \varphi = \frac{-\omega A_{\xi} A_{1\xi} + \frac{A_{2\xi} A_{\xi}^2 \omega^2 8}{3\pi} - \frac{A_{3\xi} A_{\xi}^3 \omega^3 3}{4}}{-2\gamma \sum_{i=1}^n S_{ki} \lambda_{\xi}}.$$

Период T и средняя высота $h = 2a_{w0}$ поверхностных волн определяются по известным соотношениям полуэмпирической теории [4]

$$T = 18.7 \left(\frac{gh}{W^2} \right)^{0.6} \frac{W}{g}, \quad h = 0.0042 \left(\frac{gx}{W^2} \right)^{0.333} \frac{W^2}{g},$$

где x – путь разгона ветровых поверхностных волн; W – скорость ветра.

Известны различные конструкции полупогружных платформ. Их общими элементами являются стабилизирующие понтоны; опорные колонны, к которым крепится верхняя площадка с буровой вышкой и технологическим оборудованием, жилыми модулями и запасами; система удержания платформы в точке бурения в виде якорных устройств, динамической стабилизации или комбинированного типа. ПМП с двумя понтонами наиболее удачно совмещают в себе основные качества, необходимые для плавучей стабилизированных платформ.

Коэффициенты демпфирования колебаний $A_{1\xi}$, $A_{2\xi}$, $A_{3\xi}$ определяются на основе данных лабораторных испытаний модели ПМП в гидродинамическом волновом бассейне. За основу принята нормированная зависимость силы сопротивления (демпфирования) вертикальных перемещений модели от вертикальной скорости $\partial \xi / \partial t$.

Используя условия механического подобия для реальной полупогружной платформы «Шельф» ($D=2,03 \cdot 10^8$ Н, присоединенная масса $\mu_{\xi}=6742,4$ кг, $n=8$, $S_{ki}=81,7$ м², $L_{ВП}=92,4$ м, $\delta_n=0,933$, $B=15,0$ м, $T_n=6,0$ м, $T_k=8,5$ м, $d=10,2$ м, $V_n=695$ м³, $h_k=31$ м) определены следующие значения коэффициентов вертикального демпфирования: $A_{1\xi}=14188$ Нс/м, $A_{2\xi}=1693138$ Нс²/м², $A_{3\xi}=2438119$ Нс³/м³ [3].

Величина клиренса ПМП для волн максимальной амплитуды на Черном море равна $l_k=0,6 \cdot h_{3\%W}+1,5=0,6 \cdot 2,06 \cdot 6,135+1,5=9$ м, и следовательно, $z=h_k - l_k+0,5T_p=25$ м. Коэффициент χ_ξ определяется экспериментально на основе данных модельных испытаний ППБУ. Его величина в значительной степени зависит от частоты поверхностных волн и для рассматриваемых условий она равна 0,9.

Рисунок 1– Зависимость $V=f(x)$ в линейном приближении (сплошная линия) и с учетом нелинейных членов (пунктир)

W , м/с

Результаты расчета представлены в виде графика на рисунке 1, где приведены зависимости $V=A_\xi/a_{\text{нл}}$ от скорости ветра W в линейном приближении и с нелинейных членов.

Таким образом нелинейные члены, входящие в уравнение

вертикальных колебаний ПМП, оказывают существенное влияние на демпфирование вертикальных перемещений полупогружных платформ для скоростей ветра больше 18...20 м/с.

Другим эффектом нелинейного характера колебаний ПМП является параметрическое возбуждение колебаний высокой частоты (третьей, пятой и более высокочастотных гармоник), амплитуды которых относительно малы по сравнению с амплитудой основной (первой) гармоники колебаний. Так амплитуда третьей гармоники в пять раз, а амплитуда пятой гармоники в 35,4 раза меньше амплитуды основной гармоники.

Результаты работы будут использованы при выполнении лабораторного моделирования колебаний ПМП на волнении с целью уточнения известной модели вертикальных колебаний платформы такого типа, а также при расчетах поведения таких платформ при воздействии штормовых условий.

Библиографический список

1. Иванов А.В. Качка полупогружной буровой установки типа «Акер», ориентированной под произвольным углом к волнению /А.В. Иванов// Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — Л., 1980. — Вып. 24. — С. 3 – 19.
2. Куликова А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование качки полупогружной буровой установки типа «Седко-135» /А.Н. Куликова// Вопросы судостроения. Сер. Проектирования судов. — Л., 1980. — Вып. 24. — С. 19 – 31.
3. Железняк А.В. Анализ волновых воздействий на полупогружную плавучую буровую платформу. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и

комплексное использование ресурсов шельфа /А.В. Железняк, В.М. Кушнир// Сб. науч. тр. НАН Украины: Ред. В.А. Иванов. — Севастополь, 2001. — С. 213 – 220.

4. Дубровский В.А. Многокорпусные суда / В.А. Дубровский. — Л.: Судостроение, 1978. — 365 с.

Поступила в редакцию 23.09.2004 г.