

© 1998 г. М. А. БАСИН, Ю. В. ПЫЛЬНЕВ, Ю. В. РАЗУМЕЕНКО

**О ПРИНЦИПЕ ПРОТИВОФАЗНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ
И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ СО СТОРОНЫ ВЕСОМОЙ
ЖИДКОСТИ НА НЕПОДВИЖНОЕ ТЕЛО, ПЕРЕСЕКАЮЩЕЕ СВОБОДНУЮ
ПОВЕРХНОСТЬ ВОДЫ**

В последние годы опубликованы тезисы докладов¹, и статьи [1–3], в которых показано, что в волновом поле квазистатические возмущающие силы действуют на полупогруженный объект в фазе с волной, а линейная часть сил избыточных динамических давлений и инерционная часть дифракционных сил – в противофазе. На этом принципе разработаны и запатентованы волнстойкие архитектурные формы морских объектов (МО), нейтрализующие вертикальные волновые силы [4] и моменты [5], однако, само доказательство принципа в работах [1–5] основано на линейных волновых уравнениях и приближенном представлении возмущающих сил. Поэтому возникает вопрос о границах справедливости этого принципа. В статье сделана попытка доказать справедливость принципа противофазности действия на МО квазистатических и инерционно-волновых сил в предположении об идеальности жидкости независимо от вида волновых процессов.

Пусть в идеальной весомай жидкости находится неподвижное полупогруженное тело. В случае, когда жидкость неподвижна, сила, действующая на тело, в соответствии с законом Архимеда, равна силе тяжести жидкости, вытесненной этим телом. Введем связанную с телом систему координат $Oxuz$, начало которой поместим внутри тела так, чтобы плоскость Oxz совпала с плоскостью невозмущенной свободной поверхности воды, а ось u была направлена вверх. В этом случае сила Архимеда будет определяться по формуле:

$$\bar{P}_{0hs} = \bar{j}\rho g \iiint_{V_0} dx = \bar{j}\rho g V_0 \quad (1)$$

Здесь V_0 – объем погруженной части тела, ограниченный сверху горизонтальной плоскостью совпадающей с невозмущенной границей жидкости. Пусть теперь жидкость пришла в движение и образовались волны, которые деформируют свободную поверхность. Ее уравнение может быть записано в виде.

$$y_w = y_w(x, z, t) \quad (2)$$

¹Razumeenko Ju.V., Pylnev Yu.V. The Analysis of the Surface Wave Effect on Buoyant Semi-submerged Constructions of Complex Shape // Abstracts International Session Workshop: "Laboratory Modelling of Dynamic Processes in Ocean". USSR. Academy of Sciences, Vladivostok, 1991; Пыльнев Ю.В., Разумеенко Ю.В. Принцип структурной компенсации волновых возмущающих воздействий на полупогруженные морские сооружения // Тез. докл. XXXVI Крыловских чтений. С.–Петербург: изд. ВНТО Судостроителей, 1993.

Суммарная сила \bar{P} , действующая на тело, определяется по формуле

$$\bar{P} = \int_{\Omega} p \bar{n} d\Omega \quad (3)$$

где p – давление в жидкости; \bar{n} – нормаль к смоченной поверхности твердого тела, направленная внутрь тела; Ω – смоченная поверхность тела.

Воспользовавшись уравнением Эйлера–Лагранжа и введя скалярный потенциал скорости φ , удовлетворяющий уравнению Лапласа $\Delta\varphi = 0$, получим

$$p = p_0 - \rho \partial\varphi/\partial t - \rho(\bar{\nabla}\varphi)^2/2 - gy \quad (4)$$

Подставляя в формулу (3) соотношение (4), получим следующее выражение для силы, действующей на неподвижное тело со стороны движущейся идеальной жидкости в любой момент времени

$$\bar{P}(t) = -\rho \int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + [\bar{\nabla}\varphi]^2 - gy \right\} \bar{n} d\Omega \quad (5)$$

В формуле (5) интегрирование ведется по переменной площади $\Omega(t)$ – площади смоченной жидкостью поверхности МО. Так как на свободной поверхности воды и надводной поверхности тела давление жидкости можно считать равным атмосферному p_0 , то в смоченную поверхность тела, не меняя значения силы, можно включить часть поверхности, являющейся продолжением поверхности воды, и сделать в формуле (3) смоченную поверхность замкнутой. При этом распределение фиктивных гидродинамических давлений по добавленной границе можно определить по формуле

$$p_{hd} = -\rho \partial\varphi/\partial t - \rho(\bar{\nabla}\varphi)^2/2 = gy - p_0 \quad (6)$$

После преобразований формула (5) приводится к виду:

$$\bar{P}(t) = -\rho \int_{\Omega(t)} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + [\bar{\nabla}\varphi]^2 \right\} \bar{n} d\Omega + \rho g V(t) \bar{j} \quad (7)$$

Вычитая из левой и правой частей уравнения (7) аналогичные члены уравнения (1), получим выражение для дополнительной силы, вызванной движением жидкости

$$\delta\bar{P}(t) = -\rho \int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + [\bar{\nabla}\varphi]^2 \right\} \bar{n} d\Omega + j\rho g \delta V \quad (8)$$

Первый член уравнения (8) может быть назван гидродинамической компонентой силы, действующей на погруженное тело со стороны взволнованной жидкости

$$\delta\bar{P}_{hd} = -\rho \int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{[\bar{\nabla}\varphi]^2}{2} \right\} \bar{n} d\Omega \quad (9)$$

а второй член – дополнительной гидростатической силой

$$\delta\bar{P}_{hs} = j\rho g \delta V \quad (10)$$

В случае, если тело во все время движения не пересекает свободной поверхности, то дополнительная гидростатическая сила равна нулю и на тело дополнительно действует лишь гидродинамическая сила. Возникает вопрос, какой знак имеет вертикальная составляющая гидродинамической силы при различных фазах прохождения волны и различных формах тел. Попытаемся ответить на этот вопрос, не обращаясь

непосредственно к определенной форме морского волнения и не вводя дополнительных гипотез относительно сил.

Рассмотрим вертикальный цилиндр, пересекающий поверхность воды. Будем считать, что осадка цилиндра настолько велика, что волнение вблизи донной части цилиндра затухает. Тогда, если мы проинтегрируем дополнительные давления по поверхности цилиндра, то получим нулевую вертикальную волновую силу. Между тем дополнительная гидростатическая сила в этом случае велика и ее максимальное значение для длинных волн приблизительно определяется формулой

$$\delta P_{hs} = \rho g \int_{S_{wt}} y_w dS \approx \rho g y_{wmax} S_w \quad (11)$$

Отсюда следует, что гидродинамическая сила в этом случае всегда имеет противоположный знак и ту же величину, что и гидростатическая. Итак, в этом предельном случае наблюдается полная противофазность гидродинамической и гидростатической сил.

Рассмотрим другой предельный случай, когда осадка цилиндра очень мала и поле скоростей в каждой двух точках цилиндра, лежащих на одной вертикальной прямой одинаково на дне цилиндра и на свободной поверхности. В этом случае гидродинамическая сила, действующая на цилиндр, будет равна нулю и полная вертикальная сила, действующая на цилиндр, определится лишь гидростатической силой в соответствии с формулой (10). в случае положительных координат волны, проходящей через цилиндр, она положительна, в противоположном – отрицательна. Рассмотрим еще один интересный случай, когда цилиндр полностью погружен в воду с очень большой осадкой, но верхняя часть неглубоко погружена в воду. В этом случае на цилиндр действует только одна – гидродинамическая часть сил. В случае, если рассмотренные цилиндры имеют одинаковую форму и площадь оснований и заглублиение днища первого из них равно заглублиению верхней точки второго, то силы, действующие на эти цилиндры будут иметь одинаковую величину и противоположное направление.

Таким образом, для самого общего случая волнового движения идеальной жидкости удалось показать противофазность действия дополнительных гидродинамических и гидростатических вертикальных сил, действующих на неподвижный полупогруженный морской объект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разумеев Ю.В., Пыльнев Ю.В.* Принцип структурной компенсации волновых возмущающих воздействий на полупогруженные основания морских сооружений // Докл. на Междунар. конф. "CFR-94" С.-Петербург: Изд-во СПбМТУ, 1995. С. 148–158.
2. *Пыльнев Ю.В., Разумеев Ю.В.* Способ существенного уменьшения возмущающих воздействий на плавающие и стационарные морские объекты // Изв. АН, МТТ. 1997. № 5. С. 83–99.
3. *Ермош В.К., Разумеев Ю.В., Сочагин А.Г.* Силовое воздействие внутренних волн на погруженное тело и результаты эксперимент по его определению // ВНТО им. акад. А.Н. Крылова. Материалы по обмену опытом. 1989. Вып. 462. С. 14–22.
4. *Разумеев Ю.В., Пыльнев Ю.В.* Полупогруженное основание морских сооружений. Патент России № 2 011599 с приоритетом от 08.07.91.
5. *Разумеев Ю.В., Быков Л.В., Карлинский С.Л.* Полупогруженное основание морских сооружений. Патент России № 2.034738 с приоритетом от 21.12.92.