

УДК 532.516

## ПОДЪЕМНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ЦИЛИНДР В ЖИДКОСТИ ПРИ ВИБРАЦИЯХ

© 2011 г.

В.Г. Козлов, В.Д. Щипицын

Пермский государственный педагогический университет

kozlov@pspu.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Экспериментально исследована подъемная сила, действующая на цилиндрическое тело в заполненной вязкой жидкостью полости, совершающей колебания. Найдена зависимость подъемной силы от безразмерных параметров: плотности тела, расстояния между телом и стенкой полости, амплитуды и частоты вибраций. Показано, что на расстоянии вязкого взаимодействия на тело вблизи стенки действует сила отталкивания, а на большем расстоянии – сила притяжения.

*Ключевые слова:* тело, жидкость, вибрации, подъемная сила, гидродинамическое взаимодействие.

### Постановка и результаты эксперимента

Исследуется динамика цилиндрического включения в полости прямоугольного сечения, совершающей поступательные горизонтальные вибрации. В отсутствие вибраций легкий (тяжелый) цилиндр занимает устойчивое положение в верхней (нижней) части полости, вплотную прижимаясь к ее потолку (дну). При повышении циклической частоты вибраций  $\Omega$  при заданной амплитуде  $b$  тело скачком удаляется от стенки на конечное расстояние: между цилиндром и стенкой полости появляется зазор. При большой интенсивности вибраций в надкритической области возникает осредненное тангенциальное движение тела вдоль оси вибраций. При уменьшении вибрационного воздействия пороговым образом прекращается движение цилиндра, при дальнейшем понижении частоты вибраций величина зазора монотонно уменьшается и тело скачком возвращается к стенке полости.

Определяющими динамику тела в поле силы тяжести являются вибрационный параметр  $W = (b\Omega)^2/(gd)$  [1] и безразмерная частота вибраций  $\omega = \Omega d^2/\nu$ . Последняя характеризует отношение диаметра тела  $d$  к толщине пограничного слоя Стокса  $\delta = \sqrt{2\nu/\Omega}$ . Границы перехода в подвешенное состояние (рис. 1 и 2, кривые I) и возвращения в исходное положение (IV), а также границы возбуждения (II) и прекращения осредненного тангенциального движения (III), полученные с телами разного диаметра и в жидкостях различной вязкости, удовлетворительно согласуются между собой на плоскости  $\omega, W$ . В области высо-

ких безразмерных частот,  $\omega > 300$ , пороговые кривые I и IV для легкого цилиндра слабо изменяются с частотой, гистерезис в переходах отсутствует. В случае тяжелого тела область гистерезиса в переходах существует во всем диапазоне безразмерных частот. Важным отличием является и то, что кривые II и III для тяжелого цилиндра монотонно возрастают при повышении  $\omega$ , тогда как в случае легкого тела в области высоких частот они выходят на горизонтальную асимптотику.

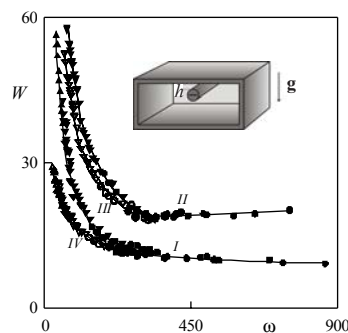


Рис. 1. Пороговые переходы легкого тела,  $\rho_s = 0.66 \text{ г/см}^3$

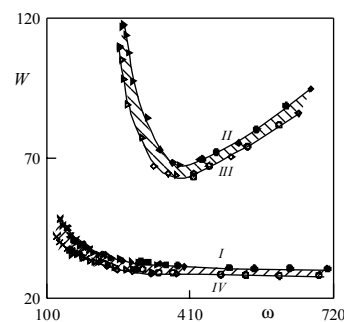


Рис. 2. Пороговые переходы тяжелого тела,  $\rho_s = 1.20 \text{ г/см}^3$

Сравнение траекторий движения цилиндра относительно полости (рис. 3), полученных посредством покадровой обработки видеозаписей скоростной видеокамеры, показывает, что причиной возникновения тангенциального движения является асимметрия колебаний: выше порога потери симметрии колебаний цилиндр начинает двигаться от одного торца кюветы к другому. Форма петли определяет направление осредненного движения тела. Стрелками отмечено направление движения вдоль траектории.

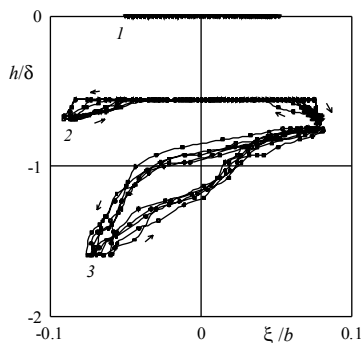


Рис. 3. Траектории осциллирующего движения тела: до отрыва (кривая 1), после отрыва (2) и при движении слева направо (3)

При вибрациях легкий цилиндр помимо квазистационарного подвеса вблизи потолка полости может иметь еще одно устойчивое состояние - вблизи дна. Такое состояние связано с действием вибрационной силы притяжения [1]. На рис. 4 представлена зависимость параметра  $W$  от расстояния до стенки в условиях квазиравновесия вблизи дна. Разные серии точек соответствуют различным параметрам эксперимента (варьировались  $b$ ,  $d$ ,  $\nu$ ). Крайние правые точки серий соответствуют минимумам кривых взаимодействия. На большем расстоянии сила уже не способна удерживать тело вблизи дна. Кривая II, проведенная через минимумы равновесных кривых, подчиняется закону  $W = 168(h/R)^{0.7}$ . Поднимающиеся с повышением  $h/R$  ветви кривых (схематично показаны штриховыми линиями) соответствуют неустойчивому состоянию тела. При этом сила притяжения умень-

шается с расстоянием от дна ( $W$  возрастает), что качественно согласуется с кривой I – теоретической зависимостью силы притяжения к стенке полости осциллирующего цилиндрического тела в пределе больших значений  $h/R$  [2].

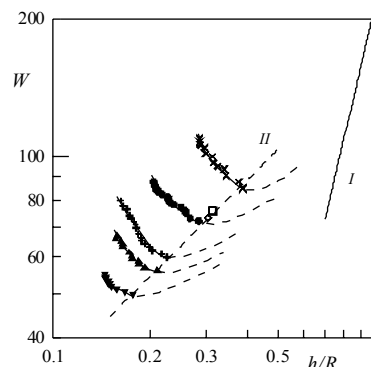


Рис. 4. Кривые равновесия легкого тела вблизи дна

Экспериментально исследовано поведение тяжелого цилиндра при комбинированных поступательно-вращательных колебаниях полости. Показано, что поведение тела определяется совместным действием двух осредненных эффектов – левитацией тела в осциллирующем сдвиговом потоке [3] и ближним гидродинамическим взаимодействием тела со стенками полости. Вибрационная подъемная сила оказывается существенно больше по величине, чем при поступательных вибрациях, и проявляется во всем объеме жидкости: она сравнима с силой тяжести и обеспечивает квазистационарный подвес и перемещение тяжелого тела в условиях земного тяготения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 09-01-00665а.*

#### Список литературы

1. Иванова А.А., Козлов В.Г., Кузаев А.Ф. // Изв. РАН. МЖГ. 2008. №2. С. 31–40.
2. Черепанов А.А. Дисс... доктора физ.-мат. наук. Пермь: ПГУ, 2000. 379 с.
3. Kozlov V.G. // Europhys. Letters. 1996. V. 36, No 9. P. 651–656.

## LIFT FORCE ACTING ON A VIBRATING CYLINDER IN A LIQUID

V.G. Kozlov, V.D. Shchipitsin

The lift force acting on the cylindrical body in an oscillating cavity filled with a viscous fluid is experimentally investigated. The dependence of lift force on the dimensionless parameters: the density of the body, the distance between the body and the wall cavity, the amplitude and frequency of vibration, is found. It is shown that at a distance of viscous interaction the force of repulsion acts on the body near the wall, and at a greater distance – the attraction force.

*Keywords:* solid, liquid, vibrations, lift force, hydrodynamic interaction.