

УДК 532.59

© 2003 г. В. И. БУКРЕЕВ, В. А. КОСТОМАХА

КОЛЕБАНИЯ ЦИЛИНДРА, ИНДУЦИРУЕМЫЕ ПОТОКОМ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

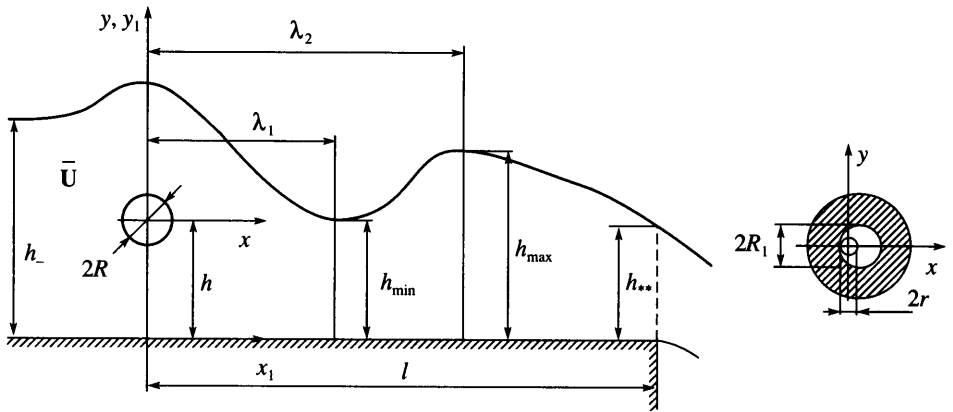
Приведены результаты опытов, в которых цилиндр, свободно расположенный на неподвижном валу, совершал малые гармонические колебания под воздействием докритического набегающего потока в открытом канале. Получены примеры сильного обратного влияния колебаний цилиндра на гидродинамический след и поверхностные гравитационные волны.

Ключевые слова: колебания цилиндра, критическая скорость, свободная поверхность, числа Фруда, Рейнольдса, Струхала.

В исследованиях классической задачи обтекания цилиндра можно выделить три направления. Подавляющее число работ посвящено случаю обтекания безграничной однородной по плотности жидкостью. В связи с данной работой из этого направления можно отметить опыты в аэродинамической трубе [1, 2], в которых изучалось влияние заданных угловых колебаний цилиндра на гидродинамический след. Второе направление посвящено эффектам, связанным с влиянием плотностной стратификации жидкости, в частности генерации движущимся цилиндром внутренних гравитационных волн. Здесь можно отметить опыты [3, 4], в которых экспериментально получены особенно интересные картины внутренних волн при колебаниях цилиндра, а также опыты с одновременным поступательным и колебательным движением цилиндра [5], когда при определенных условиях происходит резонансное усиление внутренних волн.

В третьем направлении, представленном пока небольшим числом работ, учитывается влияние свободной поверхности. В опытах [6] показано, что в случае движения погруженного цилиндра вблизи свободной поверхности покоящейся жидкости теория потенциального обтекания имеет ограниченный диапазон применимости в фазовом пространстве внешних параметров задачи. В опытах [7, 8] методом визуализации течения получены яркие примеры влияния свободной поверхности на ближний гидродинамический след за неподвижным цилиндром. В работе [9] рассмотрена та же постановка задачи, что и в [5], но для однородной жидкости со свободной поверхностью. Статья [10] и содержащийся в ней обзор отражают современное состояние расчетно-теоретических исследований задачи о колебаниях цилиндра под свободной поверхностью. В ряде работ (например [11, 12]) изучалось силовое воздействие на цилиндр набегающих волн и их отражение от цилиндра. Во всех упомянутых исследованиях цилиндр либо неподвижен, либо закон его движения задан.

В данной работе приведены результаты опытов, в которых цилиндр периодически колебался по трем ограниченным в пространстве степеням свободы, причем не под действием внешней силы, а под действием набегающего на него потока со свободной поверхностью. При этом имело место обратное влияние колебаний цилиндра на гидродинамический след и поверхностные волны. Тем самым рассмотрен достаточно простой пример взаимосвязанного движения жидкости и погруженного в нее тела. Взаимосвязанное движение тела и жидкости является одной из фундаментальных про-



Фиг. 1. Схема эксперимента и обозначения

блем корабельной гидродинамики. Ранее выполненные исследования по этой проблеме были посвящены главным образом взаимодействию поверхностных волн и плавающего на поверхности тела. Поведение свободного погруженного тела на внутренних волнах изучалось экспериментально в [13].

1. Методика эксперимента. Схема эксперимента и основные обозначения приведены на фиг. 1. В открытом канале шириной $B = 6$ см создавалось стационарное докритическое течение с глубиной h_- и расходом Q . Горизонтальный круговой цилиндр из оргстекла с внешним радиусом $R = 10$ мм располагался перпендикулярно потоку на достаточно большом удалении от входа в канал, где профиль скорости имел форму, типичную для турбулентного режима движения. У оси симметрии цилиндра имелось отверстие радиусом $R_1 = 2.5$ мм, через которое проходил неподвижный вал радиусом $r = 1.5$ мм. Ось вала располагалась на высоте h над дном канала и на расстоянии $l = 81$ см вверх по потоку от выходного сечения канала, где вода свободно изливалась в атмосферу. Между торцами цилиндра и боковыми стенками канала имелись зазоры порядка 0.5 мм. Под влиянием набегающего потока цилиндр совершал угловые колебания и колебания в продольном и вертикальном направлениях. Проводились также опыты с неподвижным цилиндром.

Далее используются две неподвижные прямоугольные системы координат, отличающиеся только положением начала отсчета вертикальной координаты. Начало системы (x, y) расположено в центре вала, ось x направлена вниз по потоку, ось y – вертикально вверх. В этой системе центр отверстия цилиндра имел координаты (x_*, y_*) . Во второй системе (x_1, y_1) начало отсчета расположено на дне канала, так что $x_1 = x$, $y_1 = y + h$. Первая система используется для описания движения цилиндра, вторая – для описания движения жидкости, в частности волн на свободной поверхности. Вертикальная координата свободной поверхности во второй системе обозначена через η .

Далее в качестве характерного масштаба длины используется R , а в качестве характерного масштаба скорости – величина $U = q/h_-$, где $q = Q/B$ – удельный расход. При этом независимыми безразмерными внешними параметрами системы являются величины

$$Fr = Ul\sqrt{2gR}$$

$$Re = \frac{2UR}{\nu}, \quad h^\circ = \frac{h}{R}, \quad h_-^\circ = \frac{h_-}{R}, \quad R_1^\circ = \frac{R_1}{R}, \quad l^\circ = \frac{l}{R}$$

$$\varepsilon = \frac{R_1 - r}{R}, \quad \rho^\circ = \frac{\rho_1 - \rho}{\rho}$$

где ρ – плотность жидкости, ρ_1 – плотность материала, из которого изготовлен цилиндр. Множество этих параметров обозначается далее как Π_i . В данных опытах имело место $\rho \approx 0.2$.

В определенных условиях существенную роль играет шероховатость стенок канала. В гидравлике влияние шероховатости стенок учитывается коэффициентом Шези C , имеющем размерность $m^{1/2}/c$ [14]. В частности, на практике в каналах большой длины именно C наряду с q и h_c определяют форму свободной поверхности [14]. В данных опытах участок течения за цилиндром был относительно мал, и влияние шероховатости было слабым. Более важным фактором, определявшим условия вниз по потоку от цилиндра, было то, что на выходе из канала устанавливалась вторая критическая глубина h_{**} , которая однозначно определяется расходом q по формулам [15]: $h_{**} \approx 0.77h_*$, $h_* = (q^2/g)^{1/3}$, где h_* – первая критическая глубина [14].

Основными искомыми функциями служили закон движения цилиндра $x_*^\circ(t, \Pi_i)$, $y_*^\circ(t, \Pi_i)$ и профиль свободной поверхности $\eta^\circ(x_1^\circ, \Pi_i)$, где t – время, верхний индекс указывает на то, что данная величина нормирована на R . Изучалась также внутренняя структура течения. Для этого в поток вносились мелкие частицы алюминиевой пудры с характерным размером 10 мкм. Траектории движения частиц получались фотосъемкой в затененном помещении при освещении световым ножом только интересующей области течения.

Закон движения цилиндра регистрировался видеосъемкой с частотой 25 кадров в секунду. Выяснилось, что под воздействием потока происходило качение поверхности отверстия цилиндра по неподвижному валу, так что точка (x_*, y_*) , совершала периодические колебания по отрезку траектории, уравнение которой в параметрической форме имеет вид

$$x_* = (R_1 - r)\cos\varphi, \quad y_* = (R_1 - r)\sin\varphi$$

где φ – угол наклона радиуса, проведенного в точку касания отверстия и вала, к оси x .

В обсуждаемых опытах параметр ϵ был мал, а угол φ менялся во времени t по гармоническому закону $\varphi = \varphi_m \sin\omega t$, где $\varphi_m(\Pi_i)$ – амплитуда, $\omega(\Pi_i)$ – угловая частота колебаний. В зависимости от q амплитуда менялась в пределах $0 \leq \varphi_m \leq 0.8$ радиан. Расчеты на компьютере и опыты показали, что при таких значениях φ_m для координат x_* и y_* с хорошей точностью можно принять

$$x_*^\circ \approx a \cos(2\omega t) + b, \quad y_*^\circ \approx c \sin(\omega t)$$

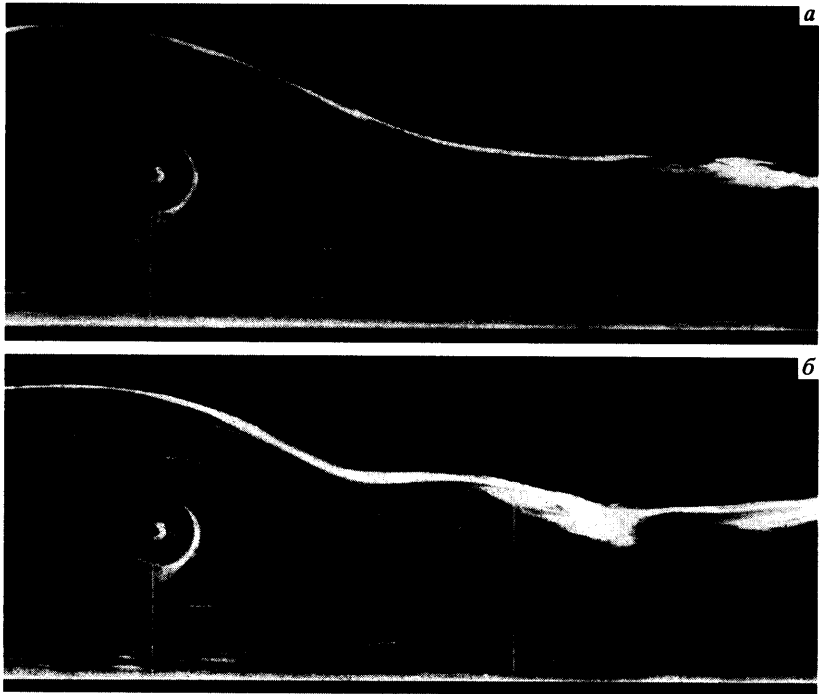
где $a(\Pi_i)$, $b(\Pi_i)$ и $c(\Pi_i)$ – параметры колебаний. Из этих формул следует, что горизонтальные колебания происходили с удвоенной частотой и со смещением на постоянную величину относительно вертикальных колебаний. При $\varphi_m < 1$ параметры колебаний связаны соотношениями

$$\varphi_m = c/\epsilon, \quad a = \epsilon - c^2/4\epsilon, \quad b = c^2/4\epsilon$$

В опытах имело место $c < \epsilon$, так что амплитуда горизонтальных колебаний была существенно меньше амплитуды вертикальных колебаний.

2. Результаты опытов. Наиболее интересный результат заключается в том, что малые колебания цилиндра, индуцированные потоком жидкости, могут очень сильно изменить течение в гидродинамическом следе и картину волн за цилиндром. Это иллюстрируется приводимыми далее примерами.

На фиг. 2 приводятся фотоснимки картины обтекания закрепленного и колеблющегося цилиндра при одинаковых значениях других внешних параметров. За неподвижным цилиндром (фиг. 2, а) образовалась отрывная зона, переходящая в узкий извилистый гидродинамический след. Эта картина аналогична той, что имеет место в безграничном потоке при соответствующих значениях Re . Влияние свободной поверх-



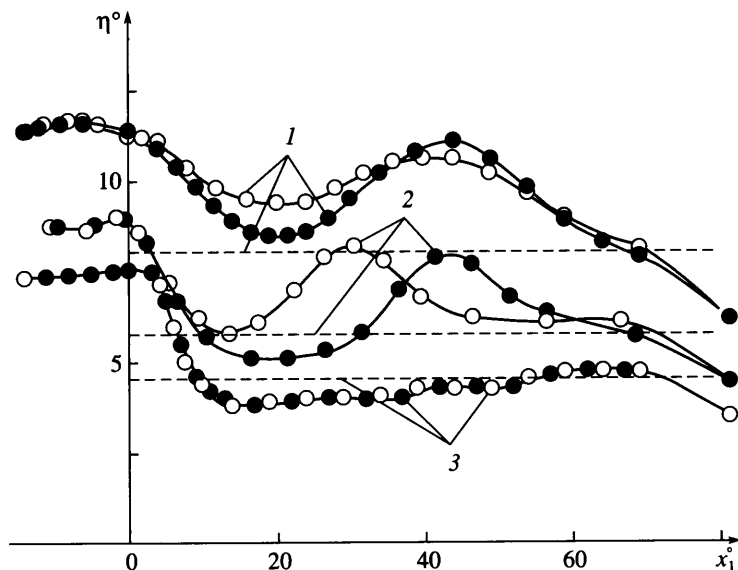
Фиг. 2. Картина обтекания цилиндра: *a* – в отсутствие колебаний, *б* – при наличии колебаний. $R = 1$ см; $U = 45.3$ см/с; $Fr = 1.022$; $Re = 9060$; $h_-^* = 8.3$; $h_0 = 4.2$; $R_1^* = 0.25$; $\varepsilon = 0.1$; $c = 0.055$

ности проявилось главным образом лишь в том, что отрывная зона наклонилась вниз. Более детальный анализ показывает, что в отрывной зоне можно выделить две области ярко выраженного вихревого движения. Непосредственно за цилиндром образуется стационарная вихревая область. Ниже по потоку вихревая область становится неустойчивой. Картина вихрей здесь непрерывно меняется во времени. Дополнительная информация о ближнем следе за неподвижным цилиндром в открытом потоке при меньших, чем на фиг. 2, *a*, заглублениях цилиндра под свободную поверхность приведена в [7, 8].

При колебаниях (фиг. 2, *б*) стационарная отрывная зона за цилиндром значительно сократилась, а неустойчивость течения за ней сильно возросла. Здесь формировалась сосредоточенная струя, периодически внедряющаяся в след то сверху, то снизу. В обсуждаемом примере при движении цилиндра вниз струя внедрялась в след снизу. При движении цилиндра вверх она внедрялась в след сверху.

Колебания цилиндра сопровождалось колебаниями свободной поверхности в его окрестности. Одинаковыми были частоты колебаний. Начальные фазы зависели от параметров Π_i . В примере на фиг. 2 колебания цилиндра и свободной поверхности происходили в противофазе: движению цилиндра вверх соответствовало отклонение свободной поверхности в противоположную сторону. При больших значениях q колебания свободной поверхности и цилиндра происходили в одинаковой фазе.

На фиг. 3 приведены примеры профилей свободной поверхности при трех сочетаниях параметров Π_i . Сплошные экспериментальные точки соответствуют обтеканию неподвижного цилиндра, в прозрачные точки – обтеканию колеблющегося цилиндра. Пунктирными линиями показаны значения критических глубин h_*^0 , разные для каж-



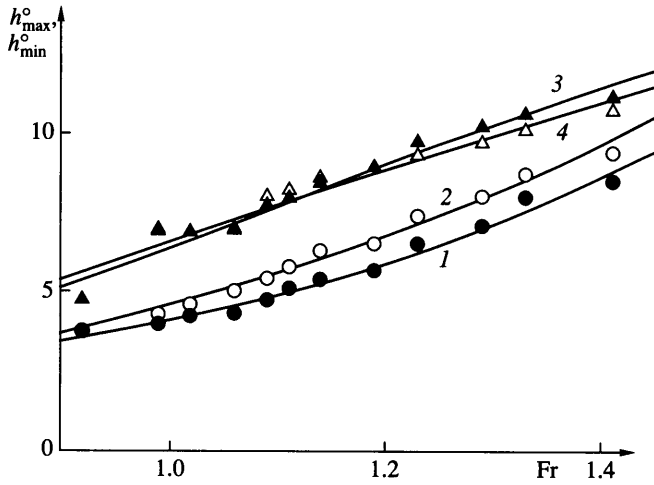
Фиг. 3. Примеры профилей свободной поверхности. $R = 1$ см; $h_0 = 4.2$; $R_1^\circ = 0.25$; $\epsilon = 0.1$ Темные точки – в отсутствие колебаний, светлые точки – при наличии колебаний, штриховые линии – значения h_*° . 1 – $h_*^\circ = 11.4$; $Fr = 1.41$; $Re = 12500$; 2 – $h_*^\circ = 8.75$; $Fr = 1.11$; $Re = 9900$; 3 – $h_*^\circ = 7.4$; $Fr = 0.92$; $Re = 8200$

дого примера. В гидравлике поток с глубиной, большей h_* , называется докритическим, а с глубиной, меньшей h_* – сверхкритическим. В данных опытах, в том числе в примерах на фиг. 3, набегающий поток был докритическим. В примере 1 на фиг. 3 поток за цилиндром остался докритическим почти всюду, за исключением небольшой по протяженности области в окрестности выхода из канала. В двух других примерах непосредственно за цилиндром поток переходил в сверхкритическое состояние.

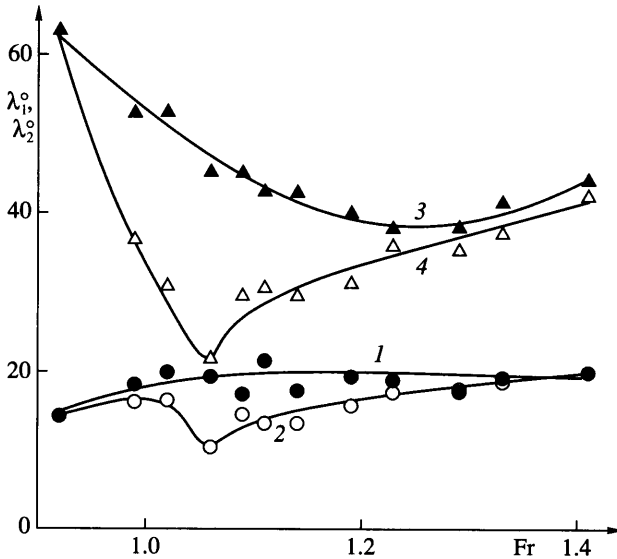
Фигура 3 показывает, что колебания не влияли на течение вверх по потоку от цилиндра. И в отсутствие колебаний, и при колебаниях перед цилиндром имело место небольшое повышение уровня. За цилиндром влияние индуцируемых потоком колебаний на профиль свободной поверхности зависит от сочетания параметров Π_i и может быть весьма значительным. В частности, в примере 2 на фиг. 3 при колебаниях расстояние до первого гребня λ_1° уменьшилась в 1.4 раза, а глубина в поперечном сечении канала $x_1^\circ = 30$ увеличилась в 1.4 раза по сравнению со случаем неподвижного цилиндра. При малых значениях Fr (пример 3 на фиг. 3) колебания цилиндра практически не влияли на форму свободной поверхности.

Более детально роль числа Fr иллюстрируется графиками на фиг. 4 и 5. Следуя гидравлической терминологии [14], назовем сжатым сечением то поперечное сечение потока, где устанавливается глубина h_{\min} (см. фиг. 1). Данные на фиг. 4 показывают, что в рассмотренном диапазоне Fr колебания существенно влияли на глубину в сжатом сечении. Влияние колебаний на величину h_{\max} более незначительно.

Зависимости расстояний от цилиндра до сжатого сечения λ_1° и до первого гребня волны λ_2° от параметра Fr приведены на фиг. 5. В некотором диапазоне Fr эти харак-

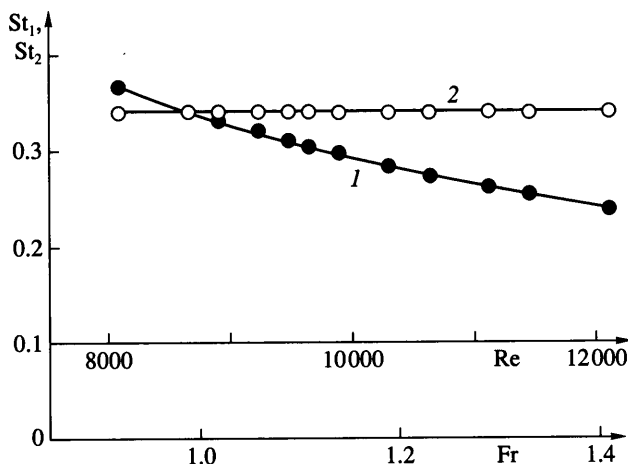


Фиг. 4. Характерные глубины потока за цилиндром: 1 – h_{\min} без колебаний, 2 – h_{\min} при колебаниях, 3 – h_{\max} без колебаний, 4 – h_{\max} при колебаниях



Фиг. 5. Зависимость λ_1 и λ_2 от Fr. Обозначения те же, что на фиг. 4

теристики волн особенно чувствительны к индуцируемому потоком малым колебаниям цилиндра. Дополнительный анализ показал, что наиболее сильное влияние колебаний проявилось в том случае, когда в сжатом сечении установилась вторая критическая глубина h_{**} . Этому режиму соответствуют фотоснимки на фиг. 2 и экспериментальные точки на фиг. 5 при $Fr = 1.06$. Видеосъемка показала, что в обсуждаемом режиме в отсутствие колебаний волна за цилиндром была гладкой, а при наличии колебаний образовался ондулярный гидравлический прыжок с обрушивающимся передним фронтом.



Фиг. 6. Зависимость чисел Струхалия от Fr и Re: 1 – St_1 , 2 – St_2

Представляют интерес два определения характерного числа Струхалия: $St_1 = nD/U$ и $St_2 = n\sqrt{D/g}$, где $D = 2R$ – диаметр цилиндра, $n = \omega/2\pi$. Первое из этих чисел является общепринятым для случая обтекания цилиндра безграничной жидкостью. Число Струхалия St_2 учитывает влияние свободной поверхности. Полученная в опытах зависимость этих чисел от Fr и Re приведена на фиг. 6.

Частоту колебаний цилиндра n в данных опытах полезно сравнить с частотой срыва вихрей N с неподвижного цилиндра в безграничном потоке. В [16] показано, что в безграничном потоке существует диапазон чисел Рейнольдса, в котором число Струхалия $St = ND/U$ постоянно и равно 0.21. Данные на фиг. 6 попадают в такой диапазон чисел Рейнольдса. Однако из-за влияния свободной поверхности число St_1 не постоянно. В рассмотренной подобласти внешних параметров это число уменьшается с ростом Fr и Re от 0.37 до 0.24. Вместе с тем существует подобласть пространства параметров Π_i , в которой число Струхалия St_2 постоянно и равно 0.34 (см. линию 2 на фиг. 6).

Заключение. Выше приведены данные только при одном значении h_0 , R_1° , l° , ρ° и ϵ . Это сочетание параметров интересно тем, что сильные изменения картины волн получены при малых значениях ϵ . Предварительные опыты показали, что при прочих равных условиях еще более сильное относительное влияние индуцированных потоком колебаний цилиндра на волны можно получить при увеличении l° . С ростом ϵ значительно возрастали амплитуды колебаний цилиндра и еще сильнее изменялась картина течения в следе. При вариации h_0 можно получить более широкий диапазон значений Fr, в котором малые колебания цилиндра сопровождаются сильными изменениями гидродинамического следа и волн. Самостоятельного изучения заслуживает случай сверхкритического набегающего потока.

Авторы благодарят А.В. Гусева за помощь в проведении опытов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 01-01-00846) в рамках ведущих научных школ России (№ 00-05-98542) и Интеграционного проекта № 1 СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujisava N., Ikemoto K., Nagaya K. Vortex shedding resonance from a rotationally oscillating cylinder // J. Fluids and Structures. 1998. V. 12. № 8. P. 1041–1053.

2. Lee T. Investigation of unsteady boundary layer developed on a rotationally oscillating circular cylinder // *AIAA Journal*. 1999. V. 37. № 3. P. 328–336.
3. Mowbray D.E., Rarity B.S.H. A theoretical and experimental investigation of the phase configuration of internal waves of small amplitude in a density stratified liquid // *J. Fluid Mech.* 1967. V. 28. Pt 1. P. 1–16.
4. Гаврилов Н.В., Ерманык Е.В. Внутренние волны, генерируемые круговым поступательным движением цилиндра в линейно стратифицированной жидкости // *ПМТФ*. 1997. Т. 38. № 2. С. 64–67.
5. Букреев В.И., Гусев А.В., Стурова И.В. Генерация внутренних волн при совместном поступательном и колебательном движении цилиндра в двухслойной жидкости // *ПМТФ*. 1986. № 3. С. 63–70.
6. Долина И.С., Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н. Смещение свободной поверхности жидкости при обтекании цилиндра // *ПМТФ*. 1988. Т. 29. № 4. С. 48–51.
7. Sheridan J., Lin J.-C., Rockwell D. Flow past a cylinder close to a free surface // *J. Fluid Mech.* 1997. V. 330. P. 1–30.
8. Hoyt J.W., Sellin R.H.J. A comparison of tracer and PIV results in visualizing water flow around a cylinder close to a free surface // *Experiments in Fluids*. 2000. V. 28. P. 261–265.
9. Zhu Q., Lin J.-C., Unal M.F., Rockwell D. Motion of a cylinder adjacent to a free-surface: flow patterns and loading // *Experiments in Fluids*. 2000. V. 28. № 6. P. 559–575.
10. Yan B. Oscillatory flow beneath a free surface // *Fluid Dynamics Research*. 1998. V. 22. № 1. P. 1–23.
11. Chaplin J.R. Nonlinear forces on a horizontal cylinder beneath waves // *J. Fluid Mech.* 1984. V. 147. P. 449–464.
12. Yan B., Riley N. Viscous flow about a submerged circular cylinder induced by free-surface travelling waves // *J. Fluid Mech.* 1998. V. 374. P. 173–194.
13. Букреев В.И., Гусев А.В., Ерманык Е.В. Экспериментальное исследование движения погруженного тела на внутренних волнах // *Изв. РАН. МЖГ*. 1995. № 2. С. 199–203.
14. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. 352 с.
15. Букреев В.И. Ондюлярный прыжок при обтекании открытым потоком порога в канале // *ПМТФ*. 2001. Т. 42. № 4. С. 40–47.
16. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1978. 736 с.

Новосибирск

Поступила в редакцию
6.VIII.2002