

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ КРУГОВЫМ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЦИЛИНДРА В ЛИНЕЙНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

УДК 532.59

Н. В. Гаврилов, Е. В. Ерманюк

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск

Хорошо известна картина волн типа «андреевского креста», возникающая при колебаниях кругового цилиндра в стратифицированной жидкости с постоянным градиентом плотности [1–6]. Она характеризуется тем, что волны генерируются только в узкой окрестности четырех лучей, исходящих под углами $|\theta| = \arcsin(\omega/N)$ [4] к горизонтали во все четыре квадранта декартовой системы координат, центр которой совмещен с центром цилиндра в его среднем по времени положении. Здесь ω — частота колебаний тела, $N = \sqrt{-g \partial \rho / (\rho \partial z)}$ — частота Вэйсяля — Брента или частота плавучести, g — ускорение силы тяжести, $\rho(z)$ — распределение плотности по глубине (ось z направлена вверх). Проводились исследования как теоретические [1–3, 6], так и экспериментальные [1, 5–8], причем источник возмущений совершал: колебания по вертикали и горизонтали [3, 5, 6], пульсирующее движение с изменением объема [6], поступательное движение под углом [7], а также совместные (поступательное и колебательное) движения [8].

Представляют интерес колебания источника в стратифицированной жидкости, когда траектория движения центра цилиндра — окружность. Такая траектория имеет важное значение в приложении к задаче о качке тела под действием волн [9].

Цель данной работы — реализация и изучение системы волн, возникающей в линейно стратифицированной жидкости при круговом поступательном движении цилиндра, когда радиус траектории мал по сравнению с поперечным размером тела. Было обнаружено, что при движении цилиндра по часовой стрелке волны генерируются только внутри полосы, проходящей через I и III квадранты. Следует отметить, что в однородной жидкости при таком движении источника вблизи свободной поверхности волны распространяются только в одну сторону — вправо (при вращении по часовой стрелке) [10].

Опыты проводили в лотке длиной 100 см, шириной 14 см и высотой 30 см. Для создания линейной стратификации через плавающие на поверхности поролоновые растекатели заливали 11 слоев жидкости с перепадом плотности между ними $\delta\rho = 0,002$ г/см³ и толщиной $\Delta h = 2,8$ см. Общая глубина жидкости $H = 28$ см (верхний и нижний слои имели толщину 1,4 см), а суммарный перепад плотности $\Delta\rho = 0,02$ г/см³. Через некоторое время (~ 24 ч) из-за диффузии примеси (глицерина), за счет которой создавалась стратификация, в лотке устанавливалось линейное распределение плотности по вертикали [11].

Генерация волн осуществлялась цилиндром диаметром $D = 3,6$ см и длиной 14 см, который совершал поступательное движение по круговой траектории с помощью специального механизма. Радиус траектории $a = 0,6$ см, период колебаний T варьировался. Цилиндр располагался на расстоянии 14 см от дна и 40 см от левой торцевой стенки лотка.

Изучаемые волны регистрировали фотосъемкой сквозь толщу жидкости матового светящегося экрана, расположенного за лотком. Для визуализации волновой картины слои при заливке через один подкрашивали чернилами. Фотосъемку и измерения проводили после нескольких периодов колебаний от начала движения цилиндра, но до того, как начинает сказываться влияние отраженных волн. С помощью датчиков резистивного типа

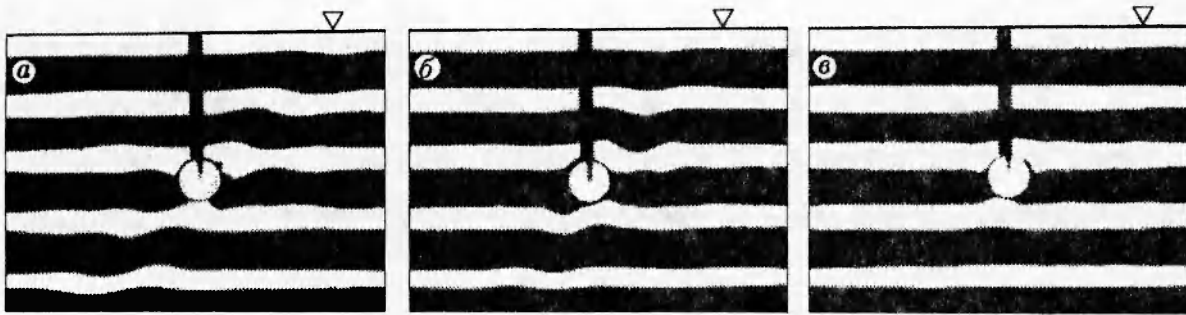


Рис. 1

с горизонтально расположенными электродами регистрировали колебания плотности в фиксированных точках внутри жидкого объема, а также измеряли распределение плотности по вертикали при невозмущенном состоянии жидкости. Принцип действия датчиков основан на том, что раствор глицерина в воде — проводник, причем проводимость прямо пропорциональна концентрации глицерина. Это позволяет восстановить профиль плотности по измеренному датчиком падению напряжения в различных точках по вертикали, если известны плотности ρ_1 и ρ_2 вблизи свободной поверхности и у дна лотка, которые измеряли с помощью стандартных ареометров.

Было проведено несколько серий опытов. На рис. 1 представлены фотографии, полученные сразу же после заполнения лотка при различных периодах колебания цилиндра (*a–в* соответствуют периодам $T = 9,6; 7,8; 6,3$ с). Распределение $N(z)$ в этой серии опытов характеризовалось наличием локальных максимумов в районах границ раздела прослоек, этим максимумам отвечает период плавучести $T^* = 4,5$ с. Линейная стратификация, создающаяся в лотке с течением времени, имеет период плавучести $T_0 = 7,36$ с.

В случае слоистой стратификации движение цилиндра по круговой траектории при $T > T_0$ порождает волновые движения в основном только в I и III квадрантах. Интенсивность возмущений во II и IV квадрантах заметно слабее (рис. 1, *a, б*). При $T^* < T < T_0$ возмущения, имеющие весьма малую длину волны, распространяются вдоль границ раздела прослоек, пересекаемых при движении цилиндра. Интенсивность возмущений справа и слева от цилиндра при этом практически одинакова (рис. 1, *в*). На рис. 1–3 треугольником показана свободная поверхность.

На рис. 2 и 3 приведены фотографии, полученные через 16 и 24 ч после заливки лотка. В первом случае распределение плотности еще имело слабое отклонение от линейного на горизонтах, соответствующих границам прослоек. Ранее выполненные опыты [11] показали, что через 19 ч после заполнения лотка толщина зоны линейного распределения плотности между слоями равна 2,8 см. В данных опытах это толщина каждого из залитых слоев. Поэтому, как и следовало ожидать, через сутки распределение плотности было линейным.

Фотографии рис. 2, *a–в* получены соответственно при $T = 10,8; 9,6; 7,8$ с, $\theta_T = 43,3$;

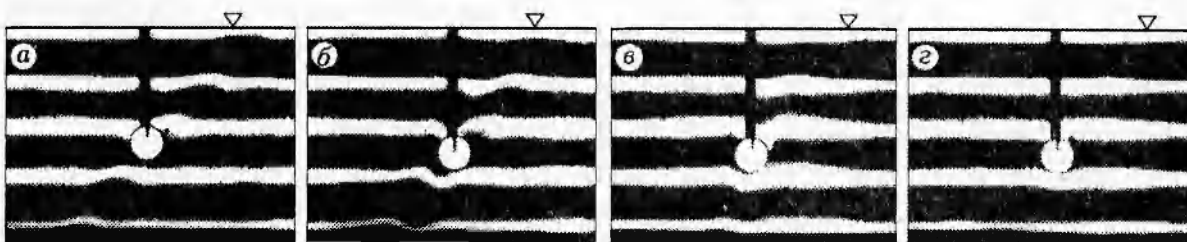


Рис. 2

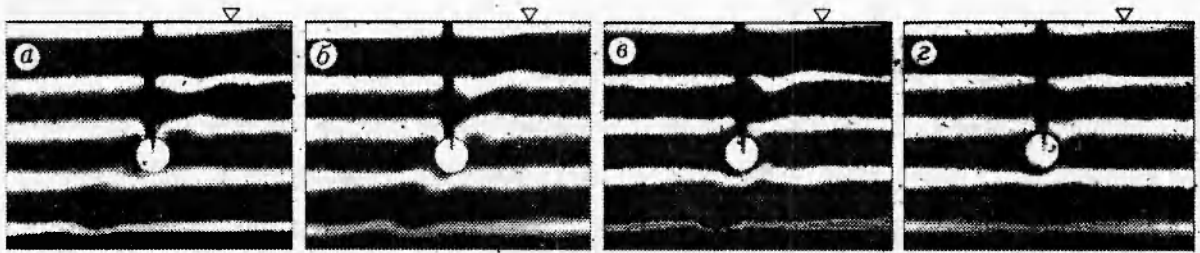


Рис. 3

50,4; 71,6°, $\theta_3 = 49$; 56; 74°, рис. 2,г при $T = 6,3$ с, а рис. 3,а-г при $T = 10,8$; 9,6; 8,5; 7,4 с, $\theta_T = 43,3$; 50,4; 60,5; 84,5°, $\theta_3 = 45$; 53; 60; 84°. Индексами τ и ε помечены теоретические и экспериментальные значения углов наклона полос, ограничивающих области распространения волн. На рис. 2 углы наклона полос систематически превышают теоретические значения, что, по-видимому, вызвано наличием слабых возмущений линейного профиля плотности. Рис. 2,г соответствует движению цилиндра с $T < T_0$. Волны при таком режиме, как и в случае колебательного движения [5, 6], не распространяются, а возмущения локализованы в окрестности цилиндра.

Экспериментально измеренные углы наклона полос на рис. 3 очень близки к теоретическим. Волновые возмущения во II и IV квадрантах отсутствуют при всех частотах колебаний цилиндра. Подобную картину следовало ожидать на основании указанных в [3] свойств симметрии и антисимметрии полей волновых возмущений, возникающих при колебаниях цилиндра по горизонтали и вертикали. Эти свойства являются общими для бимодальной и для одномодальной формы огибающей смещений частиц поперек волнового пучка [6]. Следует отметить, что возмущения во II и IV квадрантах малы и в случае, когда цилиндр колеблется возвратно-поступательно в плоскости, совпадающей с направлением лучей, проходящих через эти квадранты под углами $|\theta| = \arcsin(\omega/N)$. При этом каждой частоте ω будет соответствовать единственный угол наклона плоскости колебаний, при котором волны излучаются только в I и III квадранты [6].

Были проведены контрольные измерения колебаний плотности с помощью датчиков в фиксированных точках, расположенных на радиусе $R = 7$ см от центра круговой траектории, описываемой цилиндром. Условия проведения измерений отвечают рис. 3,б. Установлено, что отношение максимумов колебаний плотности в фиксированных точках в IV и I квадрантах не превышало 3,5 % и находилось в пределах погрешности измерений.

В данных опытах форма огибающей была бимодальной [6] (рис. 2 и 3), так как вязкий волновой масштаб $l = (\nu g/N)^{1/2}$ (ν — кинематическая вязкость жидкости) меньше диаметра цилиндра, совершавшего круговое поступательное движение (в данных опытах $l = 2,8$ см).

Рис. 2,б и 3,б соответствуют максимуму интенсивности волновых возмущений при постоянном радиусе траектории центра цилиндра. При этом $T_0/T = 0,77$, что хорошо согласуется с результатом, полученным для вертикальных колебаний цилиндра [5].

При движении цилиндра по круговой траектории наблюдалось периодическое образование высокоградиентных фронтов плотности. Они формировались при обтекании цилиндра сверху и снизу тонкими слоями жидкости с плотностью, отличной от плотности, соответствующей данному горизонту в состоянии покоя. Движение слоя жидкости по поверхности цилиндра сопровождалось спиралевидным закручиванием его передней границы в направлении против часовой стрелки (рис. 2,а,б). При движении с $T < T_0$ образования спиралевидных структур не наблюдалось.

Картина излучения волн при круговом движении цилиндра позволяет предположить, что гидродинамические нагрузки, возникающие на цилиндре, также «поляризованы» в

одном направлении. По-видимому, аналогичные эффекты имеют место и в том случае, когда цилиндр неподвижен, а движение жидкости по круговым траекториям задается набегающей внутренней волной. Этим, возможно, и объясняется «поляризация» силового воздействия внутренних волн, экспериментально обнаруженная в [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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, N 1. P. 1-16.
2. Hurley D. G. The emission of internal waves by vibrating cylinders // J. Fluid Mech. 1969. V. 36, N 4. P. 657-672.
3. Appleby J. C., Crighton D. G. Non-Boussinesq effects in the diffraction of internal waves from an oscillating cylinder // Q. J. Mech. and Math. 1986. V. 39, pt 2. P. 209-231.
4. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
5. Иванов А. В. Генерация внутренних волн осциллирующим источником // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25, № 1. С. 84-89.
6. Макаров С. А., Неклюдов В. И., Чашечкин Ю. Д. Пространственная структура пучков двумерных монохроматических внутренних волн в экспоненциально-стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26, № 7. С. 744-754.
7. Stevenson T. N. Some two-dimensional internal waves in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 1968. V. 33, N 4. P. 715-720.
8. Stevenson T. N., Thomas N. H. Two-dimensional internal waves generated by a travelling oscillating cylinder // J. Fluid Mech. 1969. V. 36, N 3. P. 505-511.
9. Хаскинд М. Д. Методы гидродинамики в проблемах мореходности корабля на волнении // Тр. ЦАГИ. 1947. № 603.
10. Сретенский Л. Н. Теория волнового движения жидкости. М.: Наука, 1977.
11. Букреев В. И., Гаврилов Н. В., Гусев А. В. Внутренние волны в пикноклине при движении крыла над барьером // ПМТФ. 1991. Т. 32, № 4. С. 68-74.
12. Гаврилов Н. В., Ерманюк Е. В. О влиянии пикноклина на силы, действующие на неподвижный эллиптический цилиндр при набегаии внутренних волн // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 6. С. 61-69.

Поступила в редакцию 13/IX 1995 г.
