

5. Селезов И. Т. Некоторые приближенные формы уравнений движения магнитоупругих сред // Изв. АН СССР. МТТ. 1975. № 5. С. 86–91.
6. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 621 с.
7. Ott E., Sudan R. N. Damping of solitary waves // Phys. Fluids. 1970. V. 13. № 6. P. 1432–1434.
8. Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. 175 с.

Киев

Поступила в редакцию
8.II.1988

УДК 532.593

АКСЕНОВ А. В., МОЖАЕВ В. В., СКОРОВАРОВ В. Е., ШЕРОНОВ А. А.

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ВНУТРЕННЕГО ЧИСЛА ФРУДА

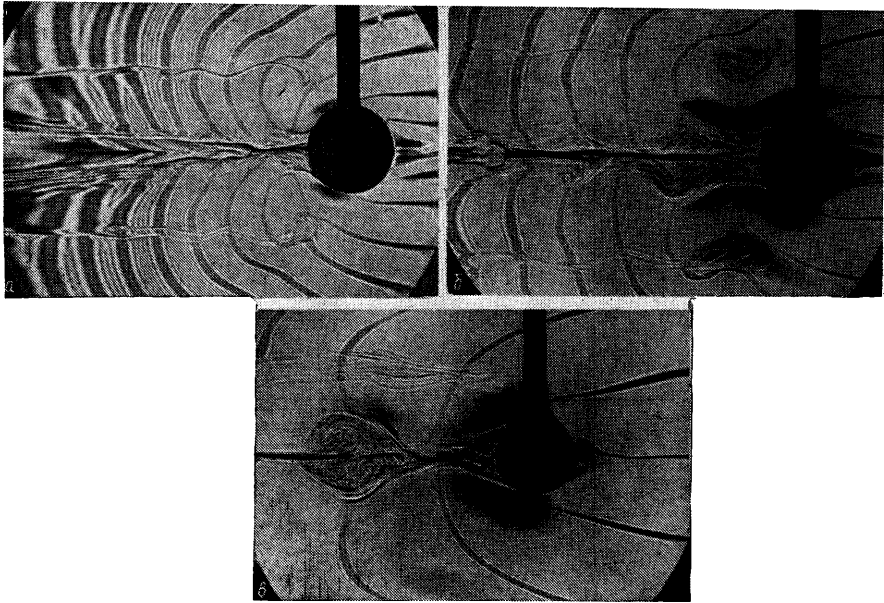
Волновые возмущения в виде внутренних гравитационных волн, возникающие при обтекании препятствия потоком стратифицированной жидкости, в свою очередь могут оказывать существенное влияние на характер самого обтекания этого тела. Степень этого воздействия зависит как от внутреннего числа Фруда F ($F=U/(NR)$), где U – скорость набегающего потока, N – частота плавучести, а R – характерный поперечный размер тела), так и от числа Рейнольдса Re . При больших числах F ($F>1$) обтекание потоком стратифицированной жидкости мало чем отличается от обтекания однородной жидкостью. Совсем иная картина наблюдается при малых числах F .

В [1] проводилось теоретическое и экспериментальное исследование областей завихренности в потоке однородно стратифицированной жидкости конечной высоты H над хорошо обтекаемым двумерным препятствием, расположенным на дне канала. Было установлено, что при $F_H < 1/\pi$ (здесь $F_H = U/(NH)$) для каждого значения F_H существует такое значение безразмерной высоты препятствия $\beta = \beta_F$, $\beta = h/H$ (h – максимальная высота препятствия), что при $\beta > \beta_F$ в потоке возникают локальные неустойчивости в распределении плотности жидкости. В этих местах возникают области завихренности или происходит обрушение волн.

В [2] дано теоретическое решение задачи об обтекании цилиндра равномерным потоком безграничной стратифицированной жидкости для так называемой модели Лонга. Было показано, что при значениях $F < 0,79$ линии тока имеют вертикальную касательную и загибаются вверх по потоку. При этих значениях F возможна потеря устойчивости течения. Здесь и далее $F=U/(NR)$, где R – радиус цилиндра. Аналогичные результаты получены при рассмотрении других моделей обтекания цилиндра [3].

Данная работа проведена с целью экспериментального исследования указанных выше особенностей, возникающих при обтекании цилиндра потоком линейно стратифицированной жидкости при малых значениях F . В ней найдены границы области внутренних чисел Фруда и Рейнольдса, при которых возникают локальные неустойчивости в распределении плотности возмущенного потока, приводящие к обрушению внутренних волн. Обнаружены периодически чередующиеся области завихренности (помимо обычной двухвихревой области в кормовой части цилиндра), возникающие в следе за цилиндром. Установлены границы области внутренних чисел Фруда и Рейнольдса, при которых они существуют. Эксперименты проводились в лабораторном бассейне размером $1,5 \times 0,25 \times 0,5$ м³. Линейное распределение плотности жидкости по высоте бассейна достигалось непрерывным заполнением бассейна водным раствором поваренной соли переменной концентрации. Измерение профиля плотности заполненного бассейна проводилось с помощью датчика солености. Исследуемые цилиндры диаметром от 2 до 4 см и длиной 21 см с помощью вертикальных подвесок крепились к тележке, которая сверху бассейна двигалась по горизонтальным рельсам. Визуализация поля возмущений при движении цилиндра в линейно стратифицированной жидкости осуществлялась методом темного поля с помощью теневого прибора ИАВ-451. Через оптические окна диаметром 20 см, смонтированные в боковые стенки бассейна, проводилось горизонтальное просвечивание жидкости в направлении, перпендикулярном скорости цилиндра (вдоль его образующих). Теневой прибор использовался в режиме визуализации горизонтального нулевого градиента оптического пути.

На фотографии фиг. 1, а показана типичная стационарная картина линий горбов и впадин плоских внутренних волн, возникающая при движении цилиндра диаметром 3,4 см слева направо со скоростью $U=0,31$ см/с, $N=0,7$ с⁻¹. Для данного случая $F=0,26$, а $Re=105$ ($Re=UD/\nu$, где D – диаметр цилиндра, а ν – кинематическая вязкость). При $F>1$ линии горбов и впадин за цилиндром (вниз по потоку) имеют



Фиг. 1

вид окружностей, расположенных соосно с цилиндром и отстоящих друг от друга на $\lambda/2$, где λ — длина внутренней волны $\lambda = 2\pi U/N$ [4].

Эти линии сильно искажены как в самом следе, так и вблизи него. Помимо этого на фотографии видны два симметричных горизонтальных следа, вызванных обрушением внутренней волны. Следы имеют волнистую форму, которая отражает распределение амплитуд в волновом поле на данном уровне. Вблизи цилиндра видны сами области, в которых происходит обрушение. В этих местах возникает локальная неустойчивость в распределении плотности жидкости по высоте: более плотная жидкость оказывается выше менее плотной и, стремясь занять свое место, она сваливается вниз.

Анализ всех наблюдаемых случаев обрушений при разных значениях U , N и R показал, что область обрушения расположена между линией горбов, находящейся на расстоянии λ от поверхности цилиндра, и соседней линией впадин, расположенной на $\lambda/2$ ближе к цилиндру. В полярной системе координат (r, φ) с центром на оси цилиндра и углом φ , отсчитываемым от скорости U , центр области обрушений всегда имеет координаты: $r \approx R + 3/4 \lambda = R(1 + 3/2 \pi F)$, $\varphi \approx 120^\circ$.

При обтекании цилиндра линейно стратифицированной жидкостью в области $F < 1$ помимо обрушений было обнаружено образование областей завихренности в следе за цилиндром. На фиг. 1, б показана фотография такого режима движения цилиндра, когда и обрушение и области завихренности в следе присутствуют одновременно. Фотография соответствует случаю, когда цилиндр диаметром 3,4 см движется слева направо со скоростью $U = 0,68$ см/с в среде с $N = 1,0$ с⁻¹. В местах пересечения линий горбов с линией движения цилиндра видны две области завихренности. Проведенные исследования во всем диапазоне чисел F , при которых они возникают, показали, что области завихренности такого типа всегда возникают только в этих местах. Количество таких областей и их размеры зависят от чисел F и Re . Случай, когда нет обрушений, а область завихренности в следе есть, показан на фотографии фиг. 1, в ($D = 2,9$ см, $F = 0,74$, $Re = 310$). В верхней части фотографии виден след от вихря, сорвавшегося, по-видимому, с державки.

Все экспериментальные результаты по обнаружению обрушений и возникновению в следе областей завихренности, полученные для различных значений D , U и N , приведены на фиг. 2. Значения чисел Re и F , при которых наблюдается устойчивая картина обрушений, лежат внутри области, границы которой отмечены точками 1. Точками 2 показана граница области существования областей завихренности в следе цилиндра (хотя бы одной). Граница области, в которой наблюдаются две или более завихренности, отмечена точками 3. Как видно из этого рисунка, границы области обрушений по числу F практически совпадают с прямыми $F = 0,15$ и $0,5$.

Нижняя граница ($F = 0,15$) довольно хорошо согласуется с результатами работы [5], в которой приводятся данные по исследованию обрушений, возникающих при обтекании стратифицированной жидкостью препятствия с треугольным сечением, расположенным на дне бассейна. Значение верхнего критического числа F в этой работе (для рассматриваемых здесь отношений радиуса цилиндра к длине) составляет примерно 0,8, в то время как в данном исследовании оно равно 0,5.

Было сделано предположение, что это расхождение вызвано некоторым отличием в обтекании цилиндра безграничным потоком стратифицированной жидкости и полуцилиндра, расположенного на дне бассейна. Эксперименты с полуцилиндром показали, что, действительно, значение верхнего критического числа F становится равным 0,8. Интенсивность обрушений в этом случае возрастает и верхняя граница области обрушений смещается. Возможно это связано с наличием пограничного слоя у поверхности дна бассейна. Координаты центра ротора, вызванного обрушением, найденные в работе [5], также хорошо согласуются с нашими результатами.

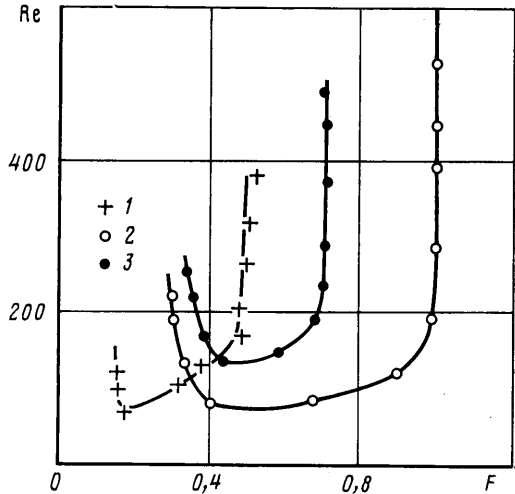
Нижнее и верхнее критические числа F существования областей завихренности в следе цилиндра равны 0,3 и 1,0. При нижней границе F происходит зарождение области завихренности. С ростом F размер области растет и в районе $F=0,6$ достигает максимального значения. Затем уменьшается и при $F=1$ полностью исчезает. Участок выхода на стационарный режим обтекания равен приблизительно 15 см. На этом участке завихренность из кормовой части цилиндра перетекает в след. В месте пересечения первой линии горбов с осью движения происходит нарастание области завихренности подобно снежному кому и сброс в следующее место зарождения и т. д. Число и размеры областей завихренности в стационарном режиме определяются числами Re и F . В этом режиме жидкость обтекает уже не только цилиндр, но и всю систему стационарных областей завихренности в следе цилиндра.

В [6] сообщаются предварительные результаты исследования влияния стратификации на область следа за цилиндром. При этом приводятся две картины обтекания цилиндра при $F=0,38$, $Re=56$ и $F=0,44$, $Re=95$. Согласно полученным в данной работе результатам, второй режим попадает на границу области существования завихренности в следе за цилиндром. Именно во втором режиме обтекания авторами было отмечено существование вихря в следе.

Как обрушение, так и образование областей завихренности в следе наблюдаются только при $F < 1$. Эта особенность обтекания цилиндра вызвана образованием слоя жидкости перед цилиндром, из которого частицы жидкости не могут обойти цилиндр ни сверху, ни снизу и вынуждены скапливаться перед ним. Их кинетическая энергия (вдали от цилиндра) $\frac{1}{2}\rho_0 U^2$ ограничивает их вертикальное перемещение ζ вблизи цилиндра ($\rho_0 U^2 \geq \rho_0 N^2 \zeta^2$) [7]. При $F=1$ максимальное вертикальное перемещение $\zeta=R$, поэтому в области $F < 1$ происходит блокировка жидкости [8]. Появление запорного слоя жидкости, который вынужден двигаться вместе с цилиндром, вызывает понижение давления в области за цилиндром (вниз по потоку) и приводит к появлению градиентов давления, направленных в сторону следа. Это хорошо видно на фиг. 1, а по искажению линий горбов и впадин в следе за цилиндром. Градиенты способствуют росту амплитуд смещения частиц вдоль первой линии впадин. Смещения частиц вдоль этой линии направлены против часовой стрелки, т. е. вдоль градиентов давления. Поэтому возникающие большие смещения частиц могут привести к образованию линий тока в форме буквы S и вызвать локальную неустойчивость в распределении плотности жидкости. При стремлении $F \rightarrow 1$ эффект уменьшается, с этим связано наличие границы (справа по F) области существования обрушений.

В теоретических работах [2, 3] значение F , при котором линии тока имеют вертикальный участок и становятся неустойчивыми, равно 0,79, так что обрушение может наступить при $F < 0,79$. Согласно экспериментальным результатам, это условие оказывается необходимым, но недостаточным. Обрушения не наблюдаются при малых числах Re (см. фиг. 2), так как при фиксированном значении F рост числа Re означает увеличение амплитуд смещения частиц жидкости, участвующих в волновом движении. Именно с этим фактором связано наличие нижней границы области появления обрушений. С уменьшением F эффективный размер препятствия, которое обтекает жидкостью, уменьшается и амплитуды внутренних волн падают. С влиянием амплитуд связан и тот факт, что обрушение наблюдается именно в том месте волнового поля, где амплитуды вертикальных смещений частиц максимальны.

При больших диаметрах цилиндров, наверное, возможно наблюдать обрушение и на последующих линиях горбов. В рассмотренном случае максимальный диаметр из исследованных цилиндров составлял 4 см. Дальнейшее увеличение диаметра было ограничено размерами бассейна.



Фиг. 2

В заключение авторы выражают благодарность И. В. Стуровой за инициативу проведения подобных исследований и А. Т. Онуфриеву за проявленный интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Long R. R. Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients // *Tellus*. 1955. V. 7. No. 3. P. 341–357.
2. Miles J. W. Lee waves in a stratified flow. Part 2. Semi-circular obstacle // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 33. No. 4. P. 803–814.
3. Аксенов А. В., Городцов В. А., Стурова И. В. Моделирование обтекания цилиндра стратифицированной идеальной несжимаемой жидкостью: Препринт ИПМ АН СССР № 282. М., 1986. 60 с.
4. Кириллов В. П., Можжев В. В., Моисеенко Г. С. и др. Возмущения, создаваемые движущимся в стратифицированной жидкости телом // *Современные проблемы механики сплошных сред. Междуведомственный сборник*. М.: МФТИ, 1985. С. 143–150.
5. Castro I. P. A note on lee wave structures in stratified flow over three-dimensional obstacles. *Tellus*. 1987. V. 39A. No. 1. P. 72–81.
6. Honji H., Kamachi M. Wakes of a circular cylinder in stratified fluids // *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.* 1984. V. 31. No. 98. P. 89–95.
7. Sheppard P. A. Airflow over mountains // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1956. V. 82. No. 365. P. 528–529.
8. Baines P. G. Upstream blocking and airflow over mountains. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987. V. 19. P. 75–97.

Москва

Поступила в редакцию
5.II.1988

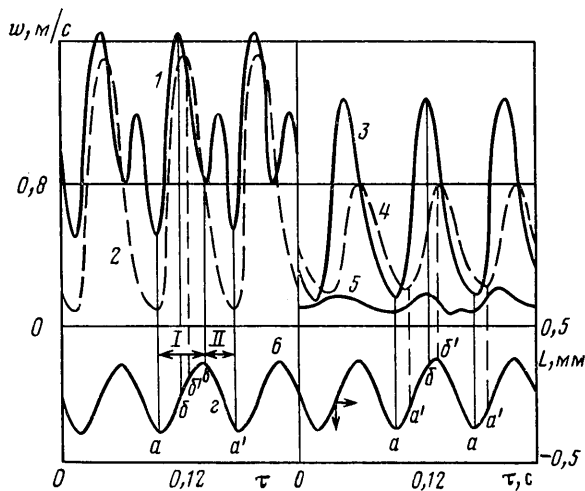
УДК 533.17

РОСЕНКО Г. Д., САПОЖНИКОВ Б. Г., УСЕНКО Ю. А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПОЛОСТИ С ВИБРИРУЮЩЕЙ ВНУТРЕННЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Исследуются закономерности истечения пульсирующих одиночной и однорядной систем струй, возникающих при поперечных колебаниях горизонтального цилиндра, размещенного коаксиально в неподвижном перфорированном кожухе.

Размещение вертикально вибрирующего тела, например горизонтального цилиндра, внутри неподвижного перфорированного кожуха с зазором, соответствующим амплитуде вибрации, позволяет в 2–2,5 раза увеличить теплообмен такого



Фиг. 1