

УДК 532.593

ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ЖИДКОСТИ НА ДИНАМИКУ ВИХРЕВОЙ ДОРОЖКИ КАРМАНА ЗА КРУГЛЫМ ЦИЛИНДРОМ

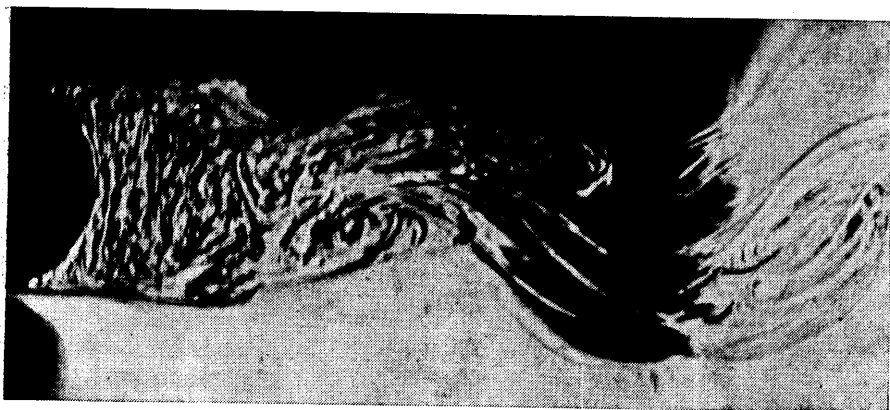
КИРИЛЛОВ В. П., МОЖАЕВ В. В., СКОРОВАРОВ В. Е.,
ШЕРОНОВ А. А.

Описываются экспериментальные результаты изучения влияния однородной стратификации жидкости на режим зарождения вихревой дорожки Кармана [1], возникающей в следе при горизонтальном стационарном движении цилиндра. В однородной среде при числах Рейнольдса $Re > 5$ за цилиндром образуются две симметричные области завихренности противоположного знака, которые движутся вместе с цилиндром. При увеличении скорости цилиндра связь вихрей с цилиндром ослабевает, они вытягиваются вдоль потока и при $Re > 40$ начинают поочередно отрываться, образуя в следе цилиндра вихревую дорожку. Частота отрыва вихрей сначала резко возрастает с ростом Re , а затем выходит на постоянное значение. Обнаружено затягивание момента начала отрыва вихрей от движущегося цилиндра в однородно стратифицированной жидкости. Получена зависимость критического числа Рейнольдса (начало срыва вихрей) от внутреннего числа Фруда. Исследовано влияние стратификации жидкости на частоту срыва вихрей в дорожке Кармана. Установлено влияние числа Фруда на зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса.

Исследование влияния однородной стратификации жидкости на начало появления вихревой дорожки Кармана и на частоту срыва вихрей проводилось в лабораторном бассейне с размерами $1 \times 0,5 \times 0,25$ м³. Для создания однородной стратификации бассейн заливался водным раствором поваренной соли переменной концентрации. Заливка бассейна проводилась после суточного отстоя воды и водного раствора соли в баках смесителя. Контроль за однородностью вертикального градиента заполненной жидкости и измерение величины самого градиента плотности проводились с помощью теневого прибора ИАБ-451. Для работы с теньевым прибором в боковые стенки бассейна были вмонтированы плоскопараллельные оптические стекла диаметром 20 и толщиной 3 см.

Визуализация областей завихренности в следе за движущимся цилиндром осуществлялась методом ножа Фуко или методом темного поля с помощью теневого прибора. Входная щель осветительной части теневого прибора шириной 0,08 мм в обоих случаях устанавливалась в вертикальное положение. Совмещение плоскости изображения щели с плоскостью ножа или непрозрачной нити (в случае метода темного поля) проводилось с помощью микроскопа, что позволяло проводить настройку с необходимой степенью точности. Оба метода в данном случае позволяли регистрировать горизонтальные градиенты плотности, возникающие при движении цилиндра.

В случае метода ножа Фуко светлые области соответствуют градиентам одного знака, а темные области — градиентам противоположного знака, при использовании метода темного поля из спектра пространственных волн вырезается нулевой порядок и темные области на снимках соответствуют нулевому градиенту плотности. При регистрации фазовых картин плоскости фотопленки (при фотографировании) или видекона (при записи на



Фиг. 1

видеомагнитофон) были оптически сопряжены с плоскостью, проходящей через передний со стороны наблюдателя торец цилиндра. При работе использовались цилиндры диаметром от 3 до 30 мм и длиной 210 мм. С помощью вертикальных подвесок они крепились к тележке, которая сверху бассейна двигалась по горизонтальным рельсам.

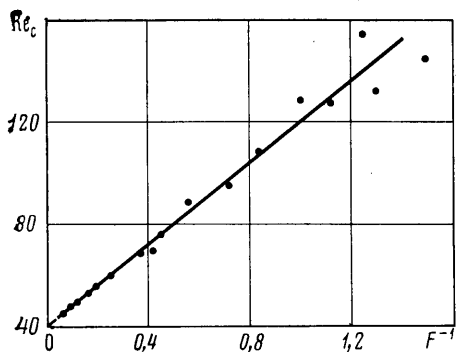
Фиксация момента начала срыва вихрей и измерение частоты срыва вихрей проводились визуально в момент движения цилиндра вдоль оптических окон бассейна. Наблюдаемая фазовая картина возмущений записывалась на видеомагнитофон, а затем просматривалась на экране телевизора при замедленной скорости воспроизведения. Проведенные наблюдения показали, что в момент отрыва область завихренности на кормовой части цилиндра начинает сильно вытягиваться вдоль следа. Одновременно с этим процессом идет процесс восполнения завихренности в области непосредственно за цилиндром. Удалившаяся часть завихренности оказывается уже в другом режиме обтекания (выходит из застойной области), она тормозится и начинается процесс разрыва двух областей завихренности. На фиг. 1 показана фотография (метод ножа Фуко) момента отрыва вихря при числе Рейнольдса $ud/\nu=450$ и числе Фруда $F=1$. Здесь и далее речь идет о внутреннем числе Фруда $F=u/Nd$, где u — скорость цилиндра, d — диаметр цилиндра, а N — частота плавучести.

Проведенные исследования показали затягивание момента начала отрыва вихрей от движущегося цилиндра в однородно стратифицированной жидкости. Была исследована зависимость критического числа Рейнольдса Re_c (начало срыва вихрей) от внутреннего числа Фруда F . На фиг. 2 показана полученная зависимость $Re_c(1/F)$, которая в исследованном диапазоне чисел Фруда имеет вид

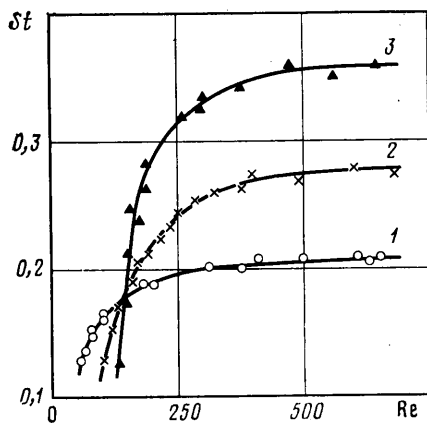
$$Re_c(F) = Re_c(\infty) + 80/F$$

Здесь $Re_c(\infty)$ — значение Re_c при $F=\infty$ (однородная жидкость), равное 40.

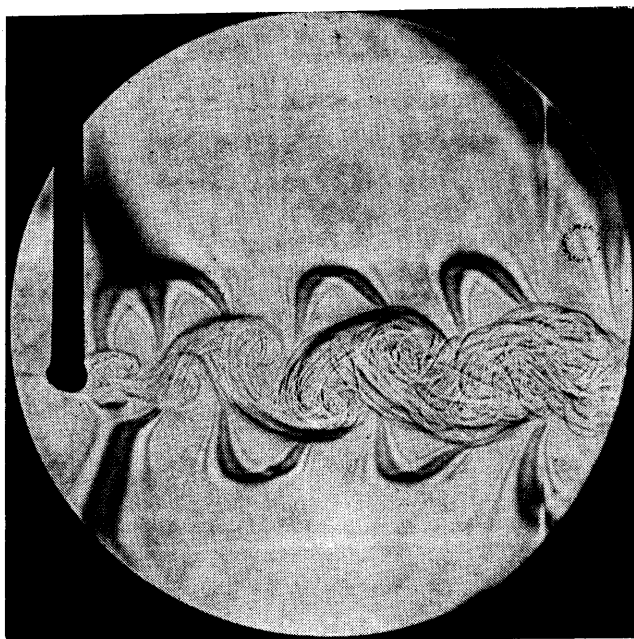
Для вертикального перемещения ξ частицы жидкости в стратифицированной среде необходима избыточная энергия $\rho_0 N^2 \xi^2 / 2$ (ρ_0 — плотность частицы). Очевидно, именно с этим связано затягивание (по числу Рейнольдса) момента начала срыва вихрей и образование дорожки Кармана. Наблюдаемые размеры области завихренности в кормовой части цилиндра в случае однородно стратифицированной жидкости существенно меньше по сравнению со случаем однородной жидкости. Например, по данным [2], относительный размер области завихренности l/d (l — размер обла-



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

сти завихренности вдоль следа) при начале срыва в однородной среде составляет $\sim 2,5$, в то время как в однородно стратифицированной жидкости при числе Фруда $F=0,5$ аналогичный размер составляет всего $0,4$. Как и Re_c , относительный размер l/d является функцией числа Фруда, и с уменьшением F размер области завихренности уменьшается.

Наличие стратификации жидкости оказывает влияние и на частоту срыва вихрей в дорожке Кармана. Безразмерным параметром, характеризующим данный временной процесс, является число Струхала $St=nd/u$, где n — число вихрей, срывающихся в единицу времени, d — диаметр цилиндра, а u — скорость цилиндра. Для однородной жидкости число Струхала является функцией Re [3]. Эта зависимость, взятая из [1], показана на фиг. 3 (сплошная кривая 1).

В экспериментах с однородно стратифицированной жидкостью было установлено, что число St уже является функцией не только Re , но и внутреннего числа Фруда. На фиг. 3 показаны две кривые из этого се-

мейства: кривая 2 соответствует постоянному значению $F=2$, а кривая 3 снята при $F=1$. Точками вблизи кривой 1 изображены результаты, полученные при $Re > 10$. С уменьшением числа Фруда, когда все большую роль начинают играть силы плавучести, кривые $St(Re)$ смещаются в область больших Re , а предельные значения числа Струхалия возрастают. Вблизи Re_c в небольшом интервале чисел Re ($Re > Re_c$) число Струхалия имеет даже меньшее значение, чем для однородной жидкости, а затем с ростом Re резко уходит в область существенно больших значений St .

Возникающая в среде вихревая дорожка порождает в однородно стратифицированной среде возмущения типа внутренних волн. На фиг. 4 показана фотография развитой дорожки Кармана при $Re=273$ и $F=4$ (метод темного поля), на которой одновременно видны стационарные волновые возмущения, вызванные движущимся цилиндром, и нестационарные возмущения, порождаемые вихревой дорожкой.

В заключение авторы выражают благодарность А. Т. Онуфриеву за интерес к работе и полезное обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 758 с.
3. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости. Т. 2. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. 408 с.

Москва

Поступила в редакцию
25.II.1985