

УДК 533.6.013.2

ОПТИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБТЕКАНИЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА НА РЕЖИМАХ РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ ПОТОКА

ГОЛОВКИН В. А., КАЛЯВКИН В. М., КОЛКОВ В. Г.

Прандтль и Титъенс [1] получили спектры течения при обтекании кругового цилиндра. Позднее к этому вопросу обращались и другие авторы, в частности [2, 3]. Исследования показали, что изменяющаяся во времени картину срывного обтекания цилиндра можно условно разбить на две основные фазы: начальную фазу симметричного течения и фазу установившегося, периодического, несимметричного течения. При симметричном обтекании цилиндра [1] в окрестности точек отрыва потока можно наблюдать дельтавидные области, выяснение структуры которых представляет интерес.

Результаты исследования методом оптической визуализации некоторых особенностей обтекания кругового цилиндра на режимах разгона и торможения потока представлены в данной работе.

1. Модель цилиндра устанавливалась в рабочей части вертикальной гидродинамической трубы (400×400 мм²) таким образом, чтобы отсутствовало протекание жидкости между торцевыми поверхностями цилиндра и стенками гидротрубы. Чувствительность визуализирующего оптического устройства позволяла получать интегральные по ходу оптического луча спектры течения вследствие естественного изменения коэффициента преломления среды, вызванного обтекаемым телом (естественная визуализация). При необходимости выделения течения в отдельном сечении модели из общей интегральной картины обтекания в этом сечении заподлицо с поверхностью цилиндра устанавливался нагревательный элемент [4], позволяющий искусственно усилить изменение оптических свойств среды в окрестности исследуемого сечения. Для устранения влияния интегральных эффектов в этом случае иногда полезно некоторое уменьшение чувствительности визуализирующего устройства.

Методические особенности эксперимента в гидродинамической трубе позволили эффективно реализовать одно из важных достоинств оптического метода: возможность следить за возникновением и развитием непрерывных вихревых слоев и тем самым более полно установить истоки и предысторию процесса вихреобразования, выявить последовательность формирования различных элементов структуры течения. На фиг. 1 видно, что спираль разгонного вихря образована достаточно тонкими вихревыми слоями, сорвавшимися с поверхности цилиндра, которые вблизи дельтавидной области состоят из различных слоев, обусловленных внешним течением и течением внутри отрывной зоны (направление набегающего потока на всех приведенных в статье снимках слева направо). Рассматривая эти слои, можно установить, из каких областей среды «черпаются» частицы жидкости, составляющие структуру вихрей. Последовательность развития течения за цилиндром во времени рассмотрена в п. 2 и 3.

Разгон потока в гидротрубе от нуля до заданного установившегося значения скорости V производился по закону, близкому к линейному, за время, соответствующее $\tau = \tau_1 = 1,5$, где $\tau = tV/D$, t — время, D — диаметр цилиндра. Значения скорости установившегося потока в гидродинамической трубе соответствовали числам Рейнольдса $700 \leq Re \leq 9000$ (за характерный линейный размер принят диаметр цилиндра).

Для регистрации процессов обтекания визуализирующее оптическое устройство использовалось в комплекте с кинокамерой, видеоманитофоном или фотоаппаратом.

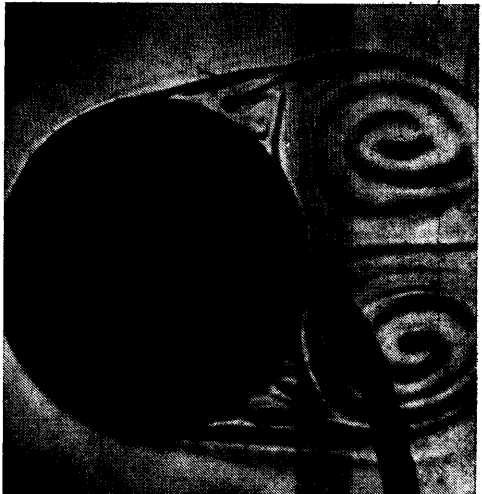
2. Представленная на фиг. 2 кинограмма показывает в последовательные моменты времени τ возникновение и развитие начальной фазы (симметричного) отрывного течения около цилиндра при увеличении скорости потока от нулевого до постоянного значения ($Re = 3100$). Начальный мо-

мент отсчета устанавливался по материалам киносъемки как момент времени, при котором в кадре появились первые признаки движения жидкости. Киносъемка производилась с частотой кадров, соответствующей $\Delta\tau=0,107$.

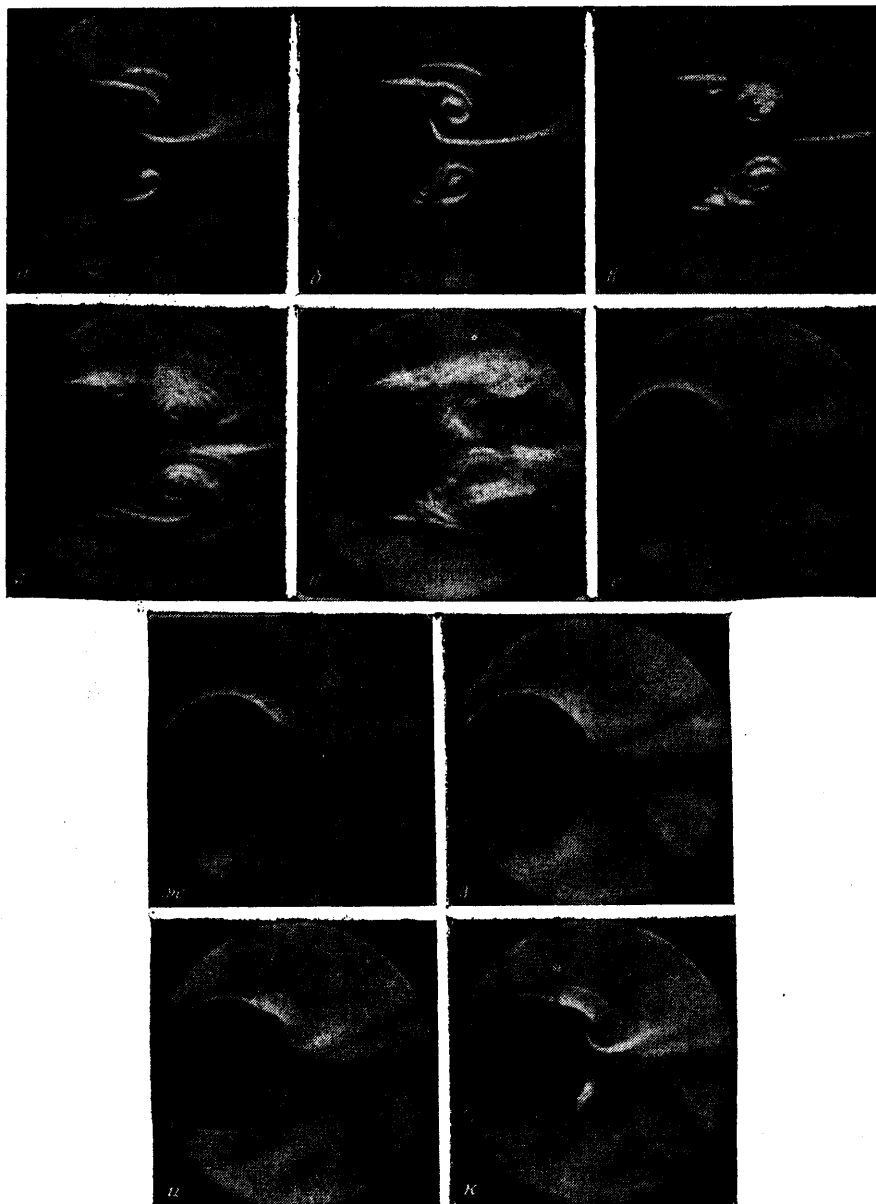
Следует обратить внимание на одну особенность развития начальной фазы течения: жидкость, участвующая в обтекании цилиндра, охватывая его, устремляется в кормовую зону в виде клинообразных областей (фиг. 2, *e* — *и*), оттесняя вниз по потоку более спокойные массы жидкости. В некоторых случаях границы клиновидных областей проявляются более четко и на более ранней стадии течения, чем на приведенной кинограмме.

На фиг. 2, *e* ($\tau=0,75$) зафиксировано безотрывное обтекание цилиндра. Далее, при $\tau=\tau_*=0,857$ сформировавшийся пограничный слой начинает отрываться. В момент времени $\tau=0,96$ (фиг. 2, *ж*) отрыв потока становится более заметным. Отрыв пограничного слоя возникает в интервале $0 < \tau \leq \tau_1$, когда на цилиндр набегают поток с постоянным во времени ускорением. Для этого случая Блазиусом [5] вычислен безразмерный момент времени $T=1,02$, когда впервые появляется отрыв пограничного слоя. Данный результат хорошо согласуется с полученным экспериментальным результатом $T=\tau_*\sqrt{2w}\approx 0,99$, где безразмерная величина ускорения $w= (dv/dt)(D/V^2)\approx 1/\tau_1$, v — текущее значение скорости потока.

Свободный слой оттесняется от поверхности цилиндра (фиг. 2, *з*, $\tau=1,29$), а точка отрыва перемещается вверх по отношению к внешнему потоку. Через некоторое время ее перемещение вдоль поверхности цилиндра замедляется, а область, расположенная непосредственно за точкой отрыва и ограниченная поверхностью цилиндра и свободным слоем, увеличивается (фиг. 2, *и*, $\tau=1,50$). В этой области согласно [1], развивается вихрь. Затем происходит перестройка течения: сходящий с тела свободный слой деформируется (фиг. 2, *а*, $\tau=2,04$), сворачиваясь позже в спиралевидный разгонный вихрь. Далее, при $\tau\geq 2,46$ (фиг. 2, *б* — *д*) происходит увеличение числа витков образовавшихся вихрей. С их ростом на кормовой поверхности цилиндра усиливается возвратное течение, сопровождающееся возникновением вторичного отрыва и формированием дельтавидной области, расположенной между точками отрыва основного и возвратного течений. Структура этой области будет рассмотрена позднее. Расстояние от цилиндра до центров разгонных вихрей в процессе их роста вначале монотонно увеличивается. Далее, при больших значениях τ , перед тем как течение потеряет симметричный характер, центры вихрей относительно цилиндра совершают небольшие колебательные движения. Структура вихрей в следе за цилиндром становится менее отчетливой вследствие рассогласования течения в различных сечениях модели и диффузии вихрей. Развитие диффузии, как правило, происходит от внешних витков к центру вихря. Этот процесс сопровождается вращательными колебаниями сохраняющегося еще ядра вихря около его центра. При нали-



Фиг. 1



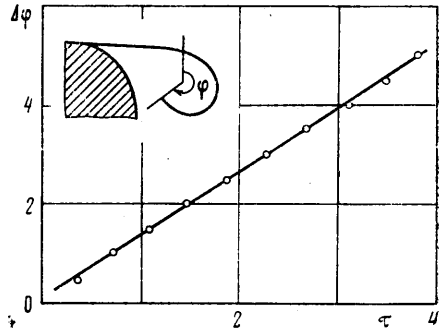
Фиг. 2

чи существенной начальной несимметрии набегающего на цилиндр потока переход от течения с парой разгонных вихрей к установившемуся, периодическому течению происходит несколько иначе: вытеснение из кормовой области цилиндра одного вихря другим осуществляется до начала развития процессов диффузии, причем синхронность обтекания различных сечений модели при этом еще сохраняется.

Используя материалы киносъемки, можно выявить закономерность нарастания витков вихрей по времени. Пусть φ — угол, характеризующий

длину наблюдаемой на кадрах спирали (фиг. 3), тогда число витков спирали $n = \varphi / 2\pi$. Если за начало отсчета принять момент времени, соответствующий значению $\varphi = \varphi_0 = \pi$, то увеличение со временем количества витков спирали или ее длины, связанной с величиной $\Delta\varphi = (\varphi - \varphi_0) / 2\pi$, характеризуется линейной зависимостью (фиг. 3). Линейный характер этой зависимости сохраняется при всех исследованных значениях скорости потока. Таким образом, частота образования витков спирали не зависит от времени при фиксированном значении скорости потока, т. е. число Струхала

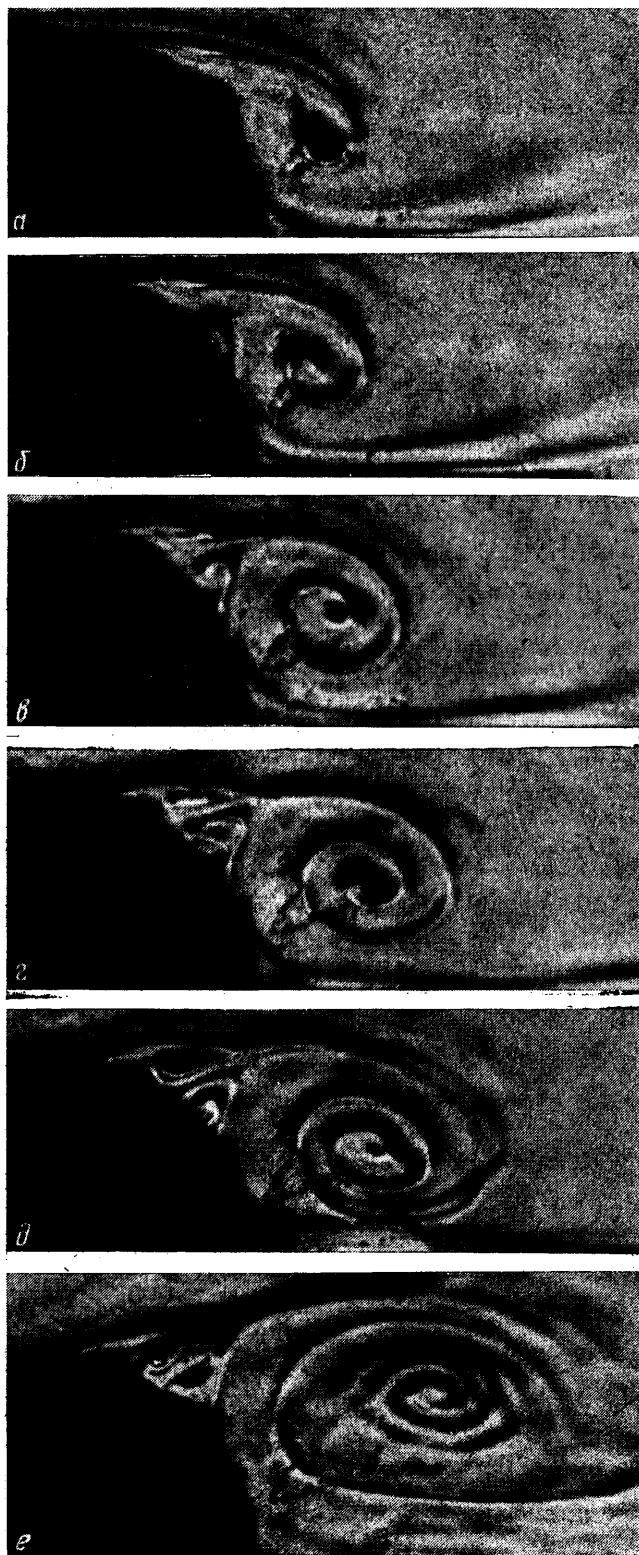
$$Sh = \frac{d\varphi}{dt} \frac{D}{V} = \frac{d\varphi}{d\tau} = \text{const}$$



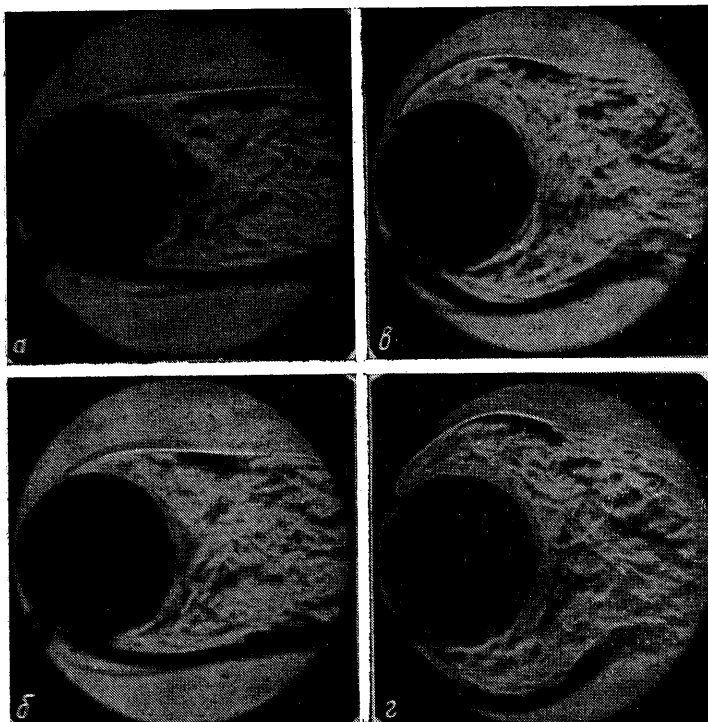
Фиг. 3

Представленные на фиг. 4 фотографии показывают формирование течения в дельтавидной области. Для более четкого выявления структуры этой области чувствительность визуализирующей установки была выбрана таким образом, чтобы элементы интегральной картины течения практически не проявлялись. После момента перестройки течения и начала образования отрывных разгонных вихрей происходит формирование в кормовой части цилиндра возвратного течения (фиг. 4, а), связанного с существованием разгонного вихря. На поверхности цилиндра можно заметить образование темной области, сливающейся с изображением модели, появление которой характеризует начало вторичного отрыва потока (τ_0). Далее (фиг. 4, б, $\tau = \tau_0 + 0,2$) вторичный отрыв проявляется более явно, оформляясь затем (фиг. 4, в, $\tau = \tau_0 + 0,49$) в виде вихря противоположного направления вращения по отношению к направлению вращения разгонного вихря. Формирующийся вторичный вихрь в процессе развития в свою очередь взаимодействует с основным течением, а именно с первоначальным вихревым слоем, сошедшим с поверхности цилиндра и образовавшим разгонный вихрь. Это сказывается в развивающемся по времени местном искривлении первичного слоя (фиг. 4, в), приводящем к возникновению нового производного (третичного) течения, которое в дальнейшем формируется в третичный вихрь (фиг. 4, г, д, $\tau = \tau_0 + 0,79; 1,18$) того же направления вращения, что и разгонный вихрь. На данном этапе развития течения вторичный и третичный вихри являются основными, наиболее крупными вихреобразованиями дельтавидной области, занимающими примерно равные части ее. В процессе развития форма спиралей, образующих эти вихри, видоизменяется: из обычной округлой (фиг. 4, в) она превращается вследствие взаимодействия друг с другом и с внешним течением в более угловатую, приближающуюся к форме треугольника (фиг. 4, д). Можно заметить также на поверхности цилиндра, вблизи вторичного и третичного вихрей, появление более мелких неоднородностей, проявляющихся в виде затемненных зон (фиг. 4, в—д) и являющихся производными течениями более высокого порядка. Далее, в моменты времени, предшествующие нарушению симметричности течения около цилиндра, рельефность внутреннего строения дельтавидной области теряется и структура ее становится более однородной (фиг. 4, е, $\tau = \tau_0 + 3,15$).

3. На фиг. 5 представлены спектры малоизученного режима течения около цилиндра при быстром торможении набегающего потока. Торможение от постоянного, установившегося значения скорости ($Re = 2000$) до



Фиг. 4



Фиг. 5

нуля происходило, так же как и в случае разгона потока, примерно по линейному закону, но с ускорением, в два раза большим. Применялся метод естественной визуализации, т. е. без использования нагревательного элемента, поскольку основной задачей являлось изучение поведения внешних границ области течения, а не детальное исследование элементов течения в отдельном сечении.

За начальный момент времени τ_0 (фиг. 5, а) принят момент, непосредственно предшествующий началу торможения. Следует заметить, что в данном случае ближайшие к цилиндру вихри дорожки Кармана находятся за границей кадра и поэтому не наблюдаются. Тем не менее заснятый на киноплёнку материал при воспроизведении на экране даёт возможность и в этом случае увидеть вихревые движения в следе за цилиндром и возвратные течения жидкости на его кормовой поверхности. Из фотографии (фиг. 5, а) видно, что при установившейся скорости потока область ближнего следа за цилиндром ограничена тонкими сошедшими с поверхности цилиндра свободными слоями. Как только начался процесс торможения потока, свободный слой вблизи точки его отрыва от поверхности цилиндра выгибается (фиг. 5, б, $\tau = \tau_0 + 0,29$) по направлению внешней нормали к границе отрывной зоны. Далее (фиг. 5, в, г, $\tau = \tau_0 + 0,72; 1,14$), под действием возвратного течения жидкости, обусловленного сохраняющимися ещё некоторое время вихрями в следе за цилиндром, эта тенденция усиливается. Возвратный поток, обтекая цилиндр, вклинивается в область жидкости, находящейся перед цилиндром. На его поверхности можно наблюдать точки отрыва возвратного течения, к которым примыкают границы деформированной отрывной зоны. Граница состоит из сформировавшегося под воздействием возвратного потока свободного вихревого слоя и образовав-

шегоса ранее при прямом обтекании цилиндра свободного слоя. Эти слои смыкаются в «угловой» точке границы (фиг. 5, в).

Выявленные в процессе исследования новые особенности обтекания кругового цилиндра неустановившимся потоком позволяют более глубоко понять механику отрывных течений. Представленные материалы показывают эффективность применения оптического метода визуализации в гидродинамической трубе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Титъенс О.* Гидро- и аэромеханика, т. 2. По лекциям Л. Правдтля. М.—Л.: ОНТИ, 1935.
2. *Петров Г. И., Штейнберг Р. И.* Исследование потока за плохо обтекаемыми телами.—Тр. ЦАГИ, 1940, вып. 482.
3. *Божков В. М., Васильев Л. Е., Жигулев С. В.* Особенности поперечного дозвукового обтекания кругового цилиндра.—Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 2.
4. *Божков В. М., Захарченко В. М., Мозольков А. С., Хонькин А. Д.* Метод визуализации дозвуковых течений и его применение к исследованию обтекания профилей.—Уч. зап. ЦАГИ, 1972, т. 3, № 5.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.

Москва

Поступила в редакцию
30.VII.1979