

УДК 532.5

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТОРНАДОПОДОБНЫХ ВИХРЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ ИНЕРЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЯХ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ

Д. Г. Ахметов, Б. А. Луговцов, В. Г. Макаренко, В. В. Никулин

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

Получены экспериментальные оценки основных параметров торнадоподобных вихрей, возникающих при возбуждении вынужденных осесимметричных инерционных колебаний большой амплитуды в твердотельно вращающейся жидкости.

Свойство гироскопической упругости твердотельно вращающейся жидкости хорошо известно и достаточно полно описано в научной литературе. О вращающейся жидкости сложилось представление как о среде, способной передавать и поддерживать колебательные движения с частотами из инерционного диапазона [1]. Такое представление при малых амплитудах колебаний соответствует экспериментальным данным. Однако, когда амплитуда колебаний становится достаточно большой, характер течения под действием этих колебаний кардинально изменяется, существенно изменяя структуру и параметры течения вращающейся жидкости.

В работах [2, 3] обнаружено, что при возбуждении на резонансных частотах вынужденных инерционных колебаний большой амплитуды в жидкости, целиком заполняющей цилиндрический сосуд, вращающийся вокруг своей оси, возникают достаточно интенсивные колеблющиеся (с периодом вынужденных колебаний) торнадоподобные вихри. В частности, при возбуждении осесимметричных колебаний возникает колеблющийся торнадоподобный вихрь (вблизи оси цилиндра), в ядре которого максимальная амплитуда завихренности $\omega_z \simeq 50\omega_0$ (ω_0 — завихренность невозмущенной, вращающейся с угловой скоростью $\Omega = \omega_0/2$ жидкости). Радиус ядра (радиус окружности, на которой азимутальная составляющая скорости достигает максимального значения) в этот момент времени $r_0 \simeq 0,05R$ (R — радиус вращающегося цилиндра). Завихренность в ядре вихря меняется во времени от первоначального значения ω_0 до максимального, но направление вращения жидкости (знак ω_z) не меняется.

Цель настоящей работы — подтверждение (проверка) существования отмеченного явления на установке с другими параметрами и получение дополнительной информации о влиянии условий проведения эксперимента и способа возбуждения вынужденных колебаний на основные характеристики возникающих торнадоподобных вихрей.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка представляет собой вращающийся с заданной угловой скоростью прозрачный цилиндрический сосуд с вертикальной осью. Дно сосуда изготовлено из тонкой деформируемой резиновой пленки, а верхний его торец герметично закрыт жесткой прозрачной крышкой. Внутренний радиус сосуда $R = 25$ см, высота $H = 38,6$ см. Сосуд полностью заполнялся жидкостью (водой).

Для того чтобы резиновое дно сосуда не прогибалось под тяжестью воды, в полость под ним нагнетался сжатый воздух. Под резиновым дном сосуда совершал вертикальное колебательное движение специальный толкатель шаровидной формы (длина хорды 12 см, высота сегмента 1,2 см), изготовленный из фторопласта, осесимметрично деформируя дно с заданными амплитудой и частотой.

Для инерционных колебаний малой амплитуды во вращающейся жидкости, находящейся в цилиндре заданных размеров, известен полный набор собственных мод и может быть вычислена любая из собственных частот. Это позволяет выбрать входные параметры эксперимента и заранее представить картину течения, так как в данной конфигурации вычисленные по линейной теории собственные частоты с высокой точностью совпадают с регистрируемыми [1]. В частности, для основной моды осесимметричных колебаний (один максимум модуля функции тока в меридиональном сечении цилиндра), которая использовалась в эксперименте, основная частота

$$\omega = 2\Omega / \sqrt{1 + \mu^2 H^2 / (\pi^2 R^2)},$$

где Ω — угловая скорость вращения цилиндра; $\mu = 3,83$ — первый корень уравнения $J_1(\mu) = 0$; J_1 — функция Бесселя первого рода.

При совпадении частоты толкателя с резонансной частотой вращающейся в начальный момент как твердое тело жидкости в последней вдоль оси сосуда возникает концентрированный торнадоподобный вихрь. Визуализация этого вихря осуществлялась с помощью мелких полистироловых шариков, запускаемых в сосуд перед началом опытов. Плотность шариков близка к плотности жидкости в сосуде. Возникающие в жидкости вихри регистрировались фотоаппаратом либо со стороны прозрачного торца сосуда, либо со стороны его боковой поверхности.

Фотографии возникающего вдоль оси вращающегося сосуда концентрированного вихря, сделанные со стороны его боковой поверхности и со стороны торца сосуда, приведены соответственно на рис. 1, 2.

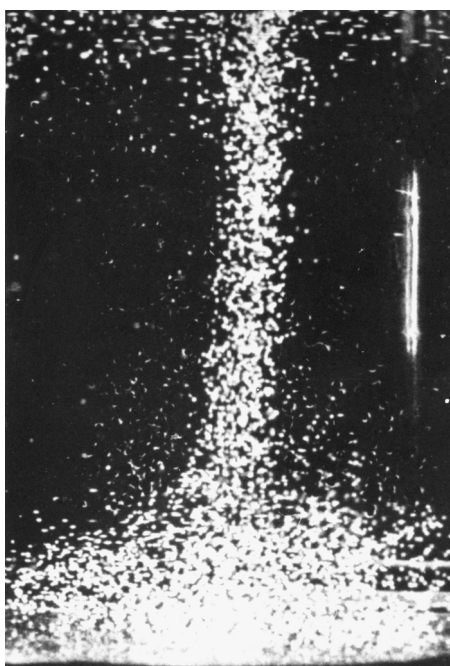


Рис. 1

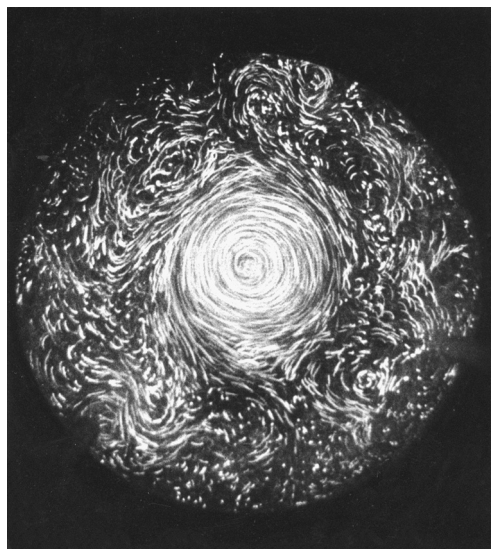


Рис. 2

Результаты измерений. Эксперименты проводились при фиксированных значениях частот вращения цилиндра и колебаний толкателя. При измерениях период вращения сосуда $T_0 = 2,4$ с (начальная завихренность жидкости $\omega_0 = 5,24 \text{ с}^{-1}$); период колебаний толкателя $T = 2,55$ с совпадает с периодом основной частоты собственных осесимметричных инерционных колебаний твердотельно вращающейся жидкости в цилиндре; амплитуда вертикальных перемещений толкателя $h = 3$ см. При таком режиме в сосуде возникал колеблющийся концентрированный вертикальный вихрь, который не был стационарным ни в пространстве (перемещался по сосуду в окрестности оси цилиндра), ни во времени. Наблюдались периодические изменения азимутальной скорости в вихре и его горизонтальных размеров (с вынужденной частотой).

Для центрирования вихря после установления колебательного режима вращение цилиндра прекращалось, и в подходящий момент времени в течение 10–15 с после остановки определялось поле скоростей. За этот промежуток времени амплитуда инерционных колебаний практически не изменялась (характерное время затухания для используемой установки $\tau \sim H/\sqrt{\nu\omega_0} \sim 10^3$ с). При этом предполагается, что возникающий нестационарный экмановский пограничный слой, за счет течения в котором происходит центрирование вихря, не оказывает существенного влияния на основные параметры торнадоподобного вихря (толщина погранслоя $\sqrt{\nu/\omega_0} \sim 0,1$ см), хотя можно ожидать появления некоторых особенностей вблизи торцов типа вихрей малого радиуса, возникающих за счет отрыва погранслоя в окрестности оси. Однако без использования этого приема измерить поле скоростей и получить результаты, содержащие значимую информацию, не удается.

Поле скоростей в вихре определялось в фазе его максимального сжатия (этот момент определялся визуально) в заданном горизонтальном сечении сосуда путем регистрации треков частиц, движущихся вместе с жидкостью. Частицы в этом сечении визуализировались плоским пучком света толщиной 1 см, который располагался на разных высотах ($H_1 = 14$ см, $H_2 = 19,3$ см, $H_3 = 37$ см) от дна сосуда. Картина прерывистых треков частиц получалась с помощью вращающегося обтюратора, который периодически перекрывал объектив фотокамеры с частотой 120 Гц. В результате на одном кадре фотопленки регистрировалось три положения каждой движущейся частицы. Одна из таких фотографий приведена на рис. 3. Обработка фотографий позволяет определить азимутальную компоненту скорости V на разных расстояниях от центра вихря r в выбранном горизонтальном сечении.

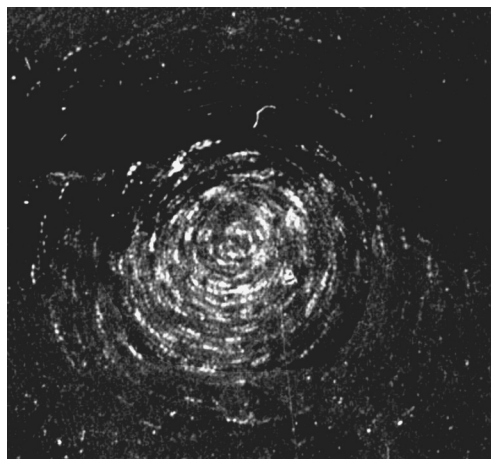


Рис. 3

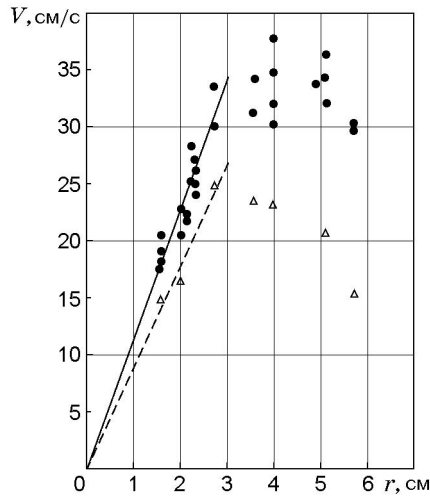


Рис. 4

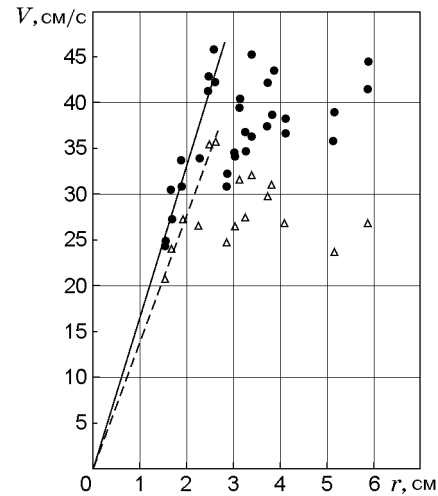


Рис. 5

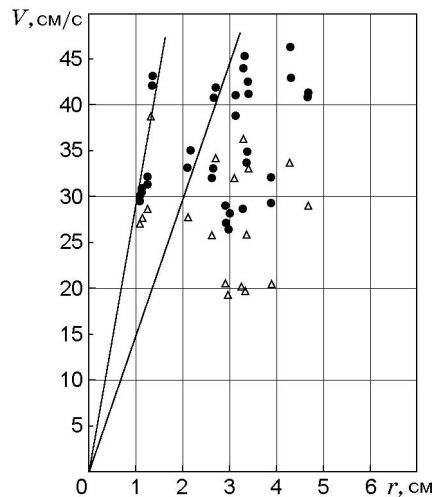


Рис. 6

Результаты обработки представлены на рис. 4–6. Точками показаны значения азимутальной скорости в неподвижной системе отсчета, треугольниками — в системе, вращающейся вместе с цилиндром. Для вихрей небольшой интенсивности (максимальная завихренность $\omega_z < 10\omega_0$) максимума азимутальной скорости в окрестности оси цилиндра в неподвижной системе отсчета может не быть. Во вращающейся системе такой максимум есть всегда, и величина радиуса, на котором он достигается, определяет степень концентрации возникшего вихря (радиус ядра вихря). Для вихрей большой интенсивности (максимальная завихренность $\omega_z \gg \omega_0$) различие между неподвижной и вращающейся системами становится несущественным. Наклон прямых линий определяет величину завихренности в соответствующих системах (сплошные — в неподвижной, штриховые — во вращающейся). Из рис. 4 ($H_1 = 14$ см) следует, что радиус ядра вихря $r_0 \simeq 3,5$ см, при этом максимум азимутальной скорости (относительно неподвижной системы) $V \simeq 35$ см/с (максимальная азимутальная скорость твердотельно вращающейся в начальный момент жидкости $V_0 = 65,4$ см/с), а максимальная завихренность в ядре вихря $\omega_z \simeq 3,8\omega_0$. На рис. 5 ($H_2 = 19,3$ см) значение $V \simeq 45$ см/с достигается при $r_0 \simeq 3,5$ см, максимальная завихренность $\omega_z \simeq 4,9\omega_0$. На рис. 6 ($H_3 = 37$ см) значение $V \simeq 45$ см/с достигается при $r_0 \simeq 3$ см, максимальная завихренность $\omega_z \simeq 5,7\omega_0$. На рис. 6 вторая сплошная

прямая с бóльшим углом наклона (штриховые линии на рис. 6 не проводились) проведена через группу точек, заметно отклоняющихся от положения большинства остальных точек. Возможно, появление этих значений азимутальной скорости свидетельствует о возникновении (за счет отрыва погранслоя от торцевой поверхности цилиндра) вторичного приосевого вихря (соосного с основным, но меньшего радиуса) с завихренностью, большей, чем в основном торнадоподобном вихре.

Значительный разброс экспериментальных точек объясняется тем, что фактически течение не было строго осесимметричным, ось вихря не совпадала с осью цилиндра, что обусловлено нестационарностью положения вихря в пространстве. Даже после центровки его вертикальная ось дрейфовала нерегулярным образом относительно центра сосуда. Кроме того, возможно образование более слабых, чем осевой вихрь, боковых вихрей, контролировать появление которых в условиях эксперимента было невозможно. Не исключено, что существенный вклад в разброс значений скорости вносят квазитурбулентные пульсации скорости (развитой турбулентности в вихре не наблюдалось), так как число Рейнольдса, в качестве которого можно взять величину $Re = H^2/(\nu T) \sim 10^4$, достаточно велико.

Вертикальные колебательные перемещения нейтрально плавучих частиц вдоль оси вихря не измерялись. Наблюдаемые амплитуды перемещения частиц были соизмеримы с высотой сосуда. Исходя из этого можно оценить порядок величины вертикальной скорости на оси вихря $W \sim H/T \simeq 15$ см/с. Квазипериодически менялись также радиусы орбит движения частиц вокруг оси вихря, отклоняясь от радиусов в невозмущенных положениях примерно в 1,5–2 раза. Нерегулярность таких колебаний не позволяет оценить эту величину более точно.

На основе проведенных экспериментов можно прийти к заключению об отсутствии постоянной составляющей завихренности на оси цилиндрического сосуда, значительно большей, чем ω_0 .

Полученные результаты качественно подтверждают вывод работ [2, 3] о возникновении торнадоподобного вихря при возбуждении инерционных колебаний большой амплитуды во вращающейся жидкости. Однако его интенсивность оказалась значительно ниже, чем в [2, 3]. По-видимому, это связано с тем, что, несмотря на использование резонансной частоты, интенсивность и размеры возникающего вихря существенно зависят от размеров установки и способа возбуждения колебаний, амплитуды и формы деформации торца на дне цилиндра, вносящего возмущения. Например, в [2, 3] отношение h/H почти в два раза больше, а отношение H/R в два раза меньше, чем в данном эксперименте. Различаются и другие параметры. Это обстоятельство затрудняет сравнение результатов, полученных на разных установках, и требует проведения систематических (весьма трудоемких) экспериментов для определения влияния параметров установки и способа возбуждения вынужденных инерционных колебаний большой амплитуды на интенсивность возникающего при этом вихря. Не исключено, что существует оптимальный набор параметров, приводящий к возникновению колебательного торнадоподобного вихря максимальной интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
2. Макаренко В. Г., Тарасов В. Ф. Экспериментальная модель смерча // ПМТФ. 1987. № 5. С. 115–122.
3. Макаренко В. Г., Тарасов В. Ф. Экспериментальная модель смерча // Докл. АН СССР. 1989. Т. 305, № 2. С. 297–300.