

Трансформация цилиндрического вихря, генерированного в вязком слое замедляющимся потоком жидкости, в кольцевой вихрь

О. Н. Мельникова,^a К. В. Показеев^b

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 05.06.2018, после доработки 08.07.2018, принята к публикации 11.09.2018.

В работе рассмотрено взаимодействие короткого цилиндрического вихря, вытянутого по поперечной координате, с потоком со сдвигом скорости вблизи твердой поверхности. Показано, как цилиндрический вихрь, концы которого опущены ко дну канала, превращается в кольцевой вихрь. Полученная качественная модель проверена в эксперименте.

Ключевые слова: генерация цилиндрических вихрей, массовые вихри в потоке со сдвигом скорости, вязкий слой потока жидкости, взаимодействие вихрей, устойчивость вихрей, подковообразные вихри.

УДК: 534.141.4, 532.5.032. PACS: 47.35.Bb, 92.10.Nm.

ВВЕДЕНИЕ

Вихри, формирующиеся в пограничном слое течений, играют большую роль в гидродинамике течений в геосредах, биологических объектах, химических и технических устройствах. Процессы вихреобразования в придонном слое турбулентного течения способствуют поддержанию турбулентного режима природных течений, интенсифицируют обмен между пристеночным слоем и ядром потока, обуславливают сопротивление обтекаемых тел. В настоящее время эти процессы в потоке изучены далеко не достаточно. Многочисленные эксперименты показали, что в полностью развитом турбулентном потоке происходит генерация цепочек подковообразных вихрей, размер которых имеет порядок толщины пограничного слоя [1–4]. Толщина пограничного слоя определяется размером донной шероховатости, структурой поля скорости и вязкостью жидкости. Для выяснения механизма генерации таких вихрей в ряде вычислительных работ исследовалась устойчивость сдвиговых течений к возмущениям различной формы [5–8]. Использовался самый перспективный и содержащий наименьшее число допущений — метод прямого численного моделирования, основанный на численном решении нестационарных уравнений Навье–Стокса или Эйлера с последующим осреднением по времени, пространству или ансамблю. Показано, что параметры вихрей определяются параметрами начальных возмущений, вносимых в поток, и их нелинейным взаимодействием. В работе [5] начальные вносимые возмущения имеют форму цилиндрического вихря с осью параллельной поперечной горизонтальной оси, а диаметр близок толщине вязкого слоя δ . В [9] подковообразные вихри возникают при воздействии наклонных кольцевых вихрей, которые, в свою очередь, формируются искусственно добавленными нисходящими потоками (sweep-структуры), хотя такие потоки и не обнаруживаются в экспериментах [10]. Однако до сих пор не найден механизм генерации первичных возмущений в численных решениях задачи, не определена их форма. Остается нерешенным вопрос и о связи возникающих структур с параметрами фонового потока. С другой стороны, в [11, 12] экспериментально установлена периодическая генерация цепочки цилиндрических вихрей таких,

как вихри, которые вносились в поток в качестве начальных возмущений в [5]. В [11, 12] исследованы потоки, полная глубина которых h превышала толщину вязкого слоя δ в 5–20 раз. Вихри образуются при периодической остановке вязкого слоя, возникающей под воздействием силы трения у подстилающей поверхности и обратного градиента давления на верхней границе вязкого слоя. В вязком слое толщиной δ вертикальный профиль скорости можно аппроксимировать линейной функцией $u(y) = u_s + \chi y$ ($\chi = 4u_s/\delta$, u_s — скорость фонового потока на нижней границе вязкого слоя). В экспериментах формировались твердотельные вихри с угловой скоростью вращения $\omega = \chi/2$, диаметра $d \approx \frac{2}{3}\delta$. Период вылета вихрей T и расстояние между вихрями s определяются полуэмпирическими выражениями [11, 12]:

$$T = \left(\frac{2\delta}{5u_s |u_x| C_f} \right)^{1/2} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{2u_s C_f}{5 |u_x| \delta}} \right), \quad (1)$$

$$s = T_s u_s - \frac{\delta}{2C_f} \ln \left(1 + u_s \frac{2C_f}{5 |u_x| \delta} \right), \quad u_x = \frac{\partial u}{\partial x},$$

где C_f — коэффициент трения скольжения жидкости по подстилающей поверхности (безразмерный). Характеристики вязкого слоя и поверхности раздела χ , δ , C_f определяются вязкостью жидкости, скоростью внешнего потока и размером донных частиц. По данным экспериментов [11], если скорость потока вне пограничного слоя $u > 20$ см/с, то $u_s = u/10$ для гладкой подстилающей поверхности (оргстекло), а толщина вязкого слоя $\delta = 0.15$ см.

В [13] показано, что цилиндрический вихрь конечно-го диаметра в потоке невязкой жидкости с вертикальным сдвигом скорости вблизи твердой поверхности перемещается по циклоидальной траектории. Высота циклоиды равна толщине вязкого слоя, а длина $\approx 5\delta$. В экспериментах [12] было показано, что цилиндр длиной $L > 100\delta$ следует расчетной траектории, совершая 2–3 перелета по циклоиде за время $t \approx 0.4$ с, что подтверждает справедливость приближения на этих временах в условиях экспериментов ($u > 7$ см/с, гладкое дно или мелкий песок). Кроме того, поле скорости было однородно вдоль поперечной оси z , а концы вихревой нити оставались в зоне формирования на дне у вертикальных стенок. Влияние изогнутых концов или «опор» вихрей на перемещение цилиндра исследовано

^a E-mail: olamel@yandex.ru

^b E-mail: sea@phys.msu.ru

Таблица. Параметры течения на рабочем участке в проведенных экспериментах

№	u , см/с	h , см	Дно	δ , см	L/δ	$\frac{\alpha t_m}{\pi}$	Re (число Рейнольдса)	Fr (число Фруда)
1	23	2	Гладкое	0.15	3.2	2.1	4600	0.52
2	7	0.8	Песок	0.3	2.1	1.2	560	0.25
3	22	2	Гладкое	0.15	2.7	1.6	4400	0.51
4	22	0.8	Песок	0.165	3	2	1760	0.78
5	7	3	Гладкое	0.2	2.7	1.5	2100	0.13

не было. Если поле скорости потока жидкости меняется вдоль поперечной координаты, то вместо длинных вихрей будут формироваться короткие вихри вдали от вертикальных стенок. Центральная часть вихря будет смещаться вдоль циклоиды, а концы вихрей остаются на дне канала: образуется изогнутая нить, напоминающая подкову, как и предсказывалось в [4, 5]. Однако до сих пор остается нерешенным вопрос о связи формы вихревых структур с параметрами фонового потока, о характере движения и деформации коротких вихрей. Решению этих задач посвящена настоящая работа.

1. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Эксперименты проводились в прямом горизонтальном канале с прозрачными стенками. Длина канала — 3.5 м, ширина — 20 см. В ряде экспериментов использовалось горизонтальное гладкое дно из оргстекла. Были эксперименты, в которых на дне канала лежал слой песка со средним диаметром песчинки 0.2 мм. Расход воды в каждом эксперименте был постоянным, глубина слоя воды увеличивалась в направлении движения (ось x) за счет торможения жидкости о шероховатые стенки канала. Дополнительная конструкция в виде выступа на вертикальной стенке формировала неоднородность поля скорости по поперечной оси z на участке протяженностью 30 см (вдоль x), ширина выступа по z равна 2 см (рис. 1). Характеристики потока и вязкого слоя в экспериментах даны в таблице. Широкий диапазон Чисел Фруда и Рейнольдса, параметров вязкого слоя позволяет сравнить результаты исследования с множеством экспериментов других авторов, а также верифицировать предложенную физическую модель и возможные численные решения в полной гидродинамической постановке. Поле скорости определялось по видеозаписи перемещения сферических шариков из полистирола диаметром 0.05 см и плотностью 1.05 г/см^3 . Форма вихревых структур фиксировалась на видеокамеру (25 кадров в секунду) при специальной

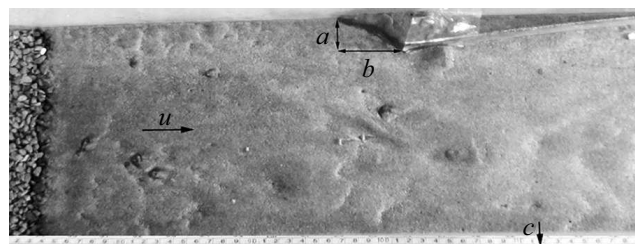


Рис. 1. Вид сверху на установку. Выступ на задней стенке канала: $a = 2$ см, $b = 3$ см. Положение камеры у передней стенки канала показано стрелкой c . Вода течет слева направо

подсветке и подкраске с помощью марганцовки. Доверительный интервал определения скорости течения не превышал 10% от измеряемой величины для доверительной вероятности 0.67.

2. ДЕФОРМАЦИЯ КОРОТКОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВИХРЯ

Для исследования деформации коротких цилиндрических вихрей в настоящей работе был проведен ряд экспериментов в потоке жидкости с неоднородным поперечным профилем скорости. Эксперименты показали, что после формирования у дна канала центральная цилиндрическая часть вихрей перемещается по циклоидальной траектории, а концы вихрей остаются на дне канала в зоне формирования, смещаясь по поперечной оси z навстречу друг другу и не перемещаясь по продольной оси x . На рис. 2 приведено изображение короткого цилиндрического вихря в верхней точке циклоидальной траектории. Запись сделана в канале с гладким дном (№ 1 в таблице). Длина цилиндрической части вихря L сопоставима с длиной наклонных опор, расположенных вдали от вертикальных стенок канала. Длина и диаметр цилиндра d_0 не менялись в процессе перемещения вдоль циклоиды. Длина наклонных опор увеличивалась, так как концы вихря оставались в зоне формирования цилиндра, не смещаясь по оси x . Удлинение опор привело к уменьшению

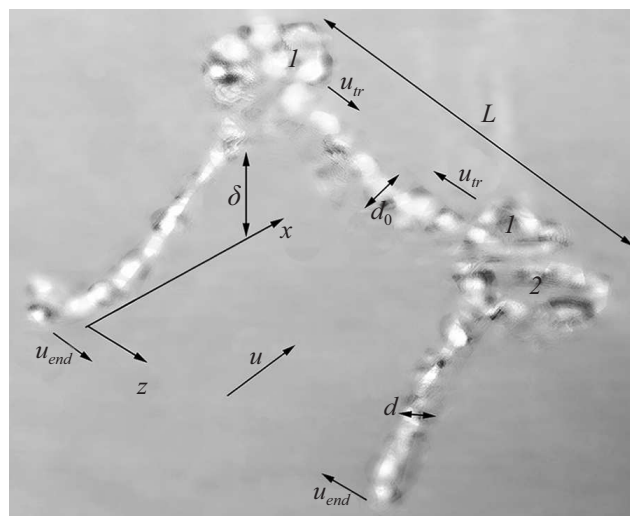


Рис. 2. Деформация короткого цилиндрического вихря длиной $L = 3.2\delta$ в верхней точке циклоидальной траектории (эксперимент № 1). 1 — вертикальные изгибы опор, 2 — горизонтальный изгиб опор, u — скорость фонового потока, u_{vr} — скорость смещения вертикального изгиба опоры, u_{end} — скорость смещения конца опоры, δ — толщина вязкого слоя, d_0 — диаметр цилиндрического вихря, d — диаметр опоры.

диаметра опор — объем опор оставался неизменным. Концы опор у подстилающей поверхности смещались навстречу друг к другу вдоль оси z . Такое смещение обусловлено влиянием твердой поверхности на вихрь, которое можно учесть введением инверсионного вихря: полученная пара вихрей (опора и инверсионный вихрь) смещается вдоль поперечной оси навстречу второй опоре. В месте соединения вертикальных опор и горизонтального цилиндра формируются изгибы вихревой нити в вертикальной плоскости (1 на рис. 2). Сравнение изображений на видеозаписи показывает, что за время движения вихря вертикальные изгибы смещаются вдоль центральной цилиндрической части вихря навстречу друг другу. Это смещение обусловлено самоиндуцированным движением изгиба, обусловленным взаимодействием горизонтального цилиндра с вертикальной опорой пространственного вихря. Смещение вертикальных изгибов порождают петли вихревой нити, лежащие в горизонтальной плоскости (2 на рис. 2).

Для того, чтобы оценить деформацию короткого вихря, будем считать, что длина опор l соответствует пути, пройденному цилиндром вдоль циклоидальной траектории. Будем считать, что циркуляция скорости вокруг опор нити радиуса a $\gamma = 2\omega\pi a^2$ и объем вращающейся жидкости опоры $l\pi a^2$ не меняются на малых временах $t < 0.4$ с, а диаметр горизонтальной цилиндрической части вихря d_0 и ее длина L остаются неизменными. Начальные условия можно записать без потери общности: $l_0 = \delta$, $a_0 = \frac{d_0}{2} = \frac{1}{3}\delta$, $\omega_0 = 2u_s/\delta$ [11, 12]. Длина опоры в момент времени t близка длине дуги циклоидальной траектории цилиндрического вихря $l = \int_0^t \sqrt{\dot{x}_{ax}^2 + \dot{y}_{ax}^2} dt$, где координаты оси цилиндра заданы уравнениями [13]:

$$\begin{aligned} x_{ax} &= 3u_s \left(\frac{\sin \alpha t}{\alpha} - t \right), \\ y_{ax} &= \frac{\sqrt{3}u_s}{\alpha} (\cos \alpha t - 1), \quad \alpha = \sqrt{3}|\omega_0|. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда длину опоры можно записать $l = \delta \frac{\sqrt{2}}{2} \times \int_0^{\alpha t} \sqrt{(\cos \alpha t - 1)(\cos \alpha t - 2)} d\alpha t$. Для получения качественной модели можно использовать линейную аппроксимацию этой зависимости, дающую точные значения в фазе максимального подъема вихря $\alpha t = \pi$ и его приземления $\alpha t = 2\pi$ (остальные значения отличаются не более чем на 15% от точной величины):

$$l = 2\sqrt{2}\delta \frac{\alpha t}{\pi}. \quad (3)$$

Считаем, что объем опоры не меняется, тогда диаметр опоры в момент времени t равен $d = d_0 \sqrt{\frac{l_0}{l}}$, и с учетом (3) получаем, что диаметр опоры определяется фазой циклоиды:

$$d = d_0 \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{2}\alpha t}}. \quad (4)$$

Полученное выражение было проверено на данных экспериментов (см. таблицу): разброс данных не превышал доверительный интервал для вероятности 0.67, определенный по 40 вихрям, и составлял не более 10% от измеряемой величины. В частности, для вихря на рис. 2 отношение $(\frac{d_0}{d})_{\text{exp}} \approx 1.8$, а расчетная величина $(\frac{d_0}{d}) \approx 1.7$.

3. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОПОР ВИХРЯ ВДАЛИ ОТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕНОК КАНАЛА

Скорость смещения вертикальных изгибов опор вихря может быть оценена сверху скоростью смещения кольцевого вихря диаметра D с конечным диаметром ядра d [14]:

$$u_{tr} = \frac{\gamma}{2\pi D} \left(\ln \frac{8D}{d} - \frac{1}{4} \right). \quad (5)$$

Эксперимент показал, что диаметр вертикального изгиба слабо меняется со временем и составляет $D \approx 2d_0$. С учетом (4) скорость смещения вертикального изгиба вдоль горизонтального цилиндра (ось z) u_{tr} определяется выражением

$$u_{tr} = \frac{u_s}{6} \left(\ln \frac{d_0}{d} + 2.5 \right) \approx \frac{u_s}{6} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{\alpha t}{\pi} + 3 \right). \quad (6)$$

Концы опор у дна канала тоже сближаются, так как испытывают воздействие границы раздела, которое может быть учтено введением инверсного вихря для выполнения условия непротекания на твердом дне. Скорость смещения конца опоры вдоль оси z можно приблизительно оценить скоростью перемещения пары вихрей $u_{end} = \gamma/(2\pi d)$ [15], а с учетом (4)

$$u_{end} = \frac{u_s}{3} \frac{d_0}{d} \approx \frac{u_s}{3} \sqrt{2\sqrt{2} \frac{\alpha t}{\pi}}. \quad (7)$$

Расчеты по (6), (7) показывают, что скорость смещения торцов вихря вдоль оси z ниже скорости смещения вертикальных изгибов в начале циклоиды. В зоне первого максимума циклоиды ($\alpha t = \pi$) скорости смещения

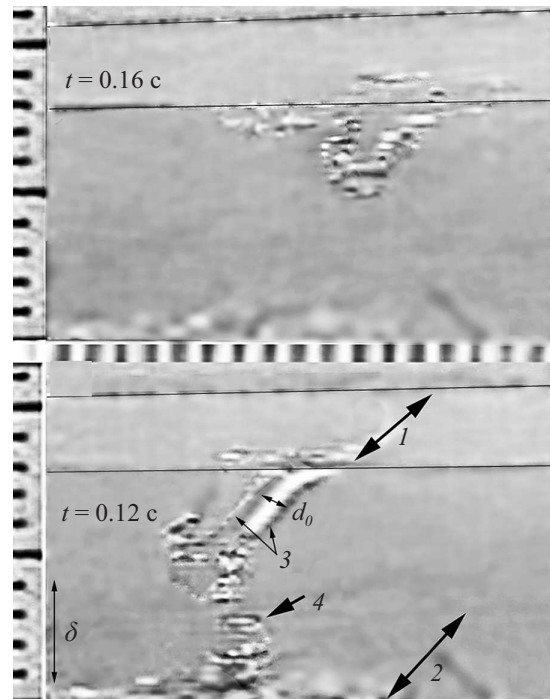


Рис. 3. Формирование кольцевого вихря (эксперимент № 2). 1 — поверхность воды, 2 — песчаное дно, 3 — кольцевой вихрь образован цилиндрическим вихрем диаметра d_0 и опорой меньшего диаметра, 4 — мелкие торы формируются при разрушении нижней части опор.

приблизительно одинаковые, а в зоне приземления вихря $\alpha t = 2\pi$ скорость торцов в полтора раза выше. Когда опоры вихря встречаются, то цилиндрическая часть и верхняя часть опоры образуют кольцевой вихрь, а нижние части опор разрушаются с образованием мелких торцов (рис. 3, эксперимент № 2). На нижнем кадре рис. 3 показан момент формирования кольцевого вихря. Хорошо виден цилиндрический вихрь, сохранивший начальный диаметр d_0 , и тонкая опора, составляющая с цилиндром кольцевой вихрь (3 на рис. 3).

4. ДЕФОРМАЦИЯ ВИХРЯ С ОПОРОЙ У ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ КАНАЛА

На рис. 4 показаны 2 кадра, на которых зафиксирован короткий вихрь у вертикальной стенки канала (эксперимент № 5). Одна опора вихря расположена у вертикальной стенки канала (1 на рис. 4), а другая — вдали от стенки. Конец дальней опоры смещается вдоль поперечной оси z (показано стрелкой 4), а конец пристеночной опоры вообще не смещается (положение на двух кадрах показано стрелкой 3). Можно предположить, что в угловой зоне канала взаимодействие конца опоры с тремя инверсными вихрями, учитывающими воздействие стенок, прижимает вихрь ко дну, не позволяя покинуть зону формирования: передняя опора

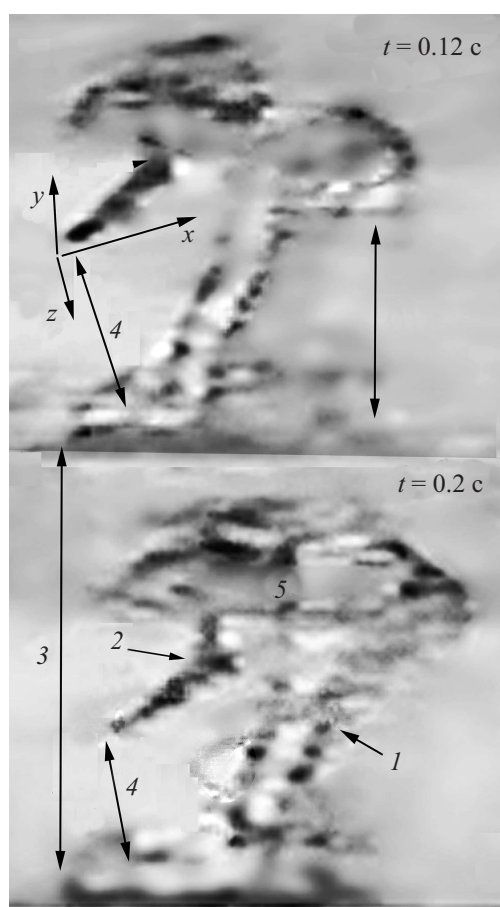


Рис. 4. Короткий вихрь с опорой у вертикальной стенки (эксперимент № 5). 1 — вертикальная опора у вертикальной стенки канала, 2 — опора вдали от стенки, 3 — конец опоры у стенки не смещен на приведенных кадрах, 4 — расстояние между концами опор уменьшается за счет смещения конца дальней опоры, 5 — формирование кольцевого вихря

удлиняется, но не покидает стенку. Вертикальные изгибы опор смещаются вдоль цилиндра одинаково. На нижнем кадре запечатлен момент встречи опор и формирования кольцевого вихря (5 на рис. 4).

5. ОБРАЗОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ

Для того, чтобы сформировался кольцевой вихрь, опоры цилиндрического вихря должны встретиться, сместившись на $L/2$ каждая. При расчете пути, пройденного опорами, следует учесть толщину опор в начале подъема вихря. Если для простоты взять в качестве скорости смещения опор скорость концов опор (7), то момент времени встречи опор (и формирования кольцевого вихря) t_m определяется уравнением:

$$L - \delta = 2 \int_0^{t_m} u_{end} dt. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\left(\frac{\alpha t_m}{\pi}\right) \approx 1.3 \left(\frac{L}{\delta} - 1\right)^{\frac{2}{3}}. \quad (9)$$

В левой части (9) — фаза циклоиды, в которой формируется кольцевой вихрь. Чем длиннее начальный цилиндрический вихрь, тем позже формируется кольцевой вихрь. В соответствии с (9) в фазе $\alpha t = \pi$ (максимальная высота подъема вихря) формируется кольцевой вихрь, если начальная длина цилиндра составляет $L = 1.7\delta$. В фазе $\alpha t = 2\pi$ (приземление вихря) кольцевой вихрь формируется, если начальная длина равна $L = 3\delta$. В таблице приведены фазы образования кольцевого вихря в экспериментах. Отличия от расчетов лежат в пределах доверительного интервала, рассчитанного по 40 вихрям для вероятности 0.67, и не превышают 10% от измеряемой величины. На рис. 5 приведены значения фазы циклоиды, в которой формируется кольцевой вихрь, полученные в эксперименте и расчетах. График позволяет увидеть отклонение экспериментальных данных от точных значений. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных

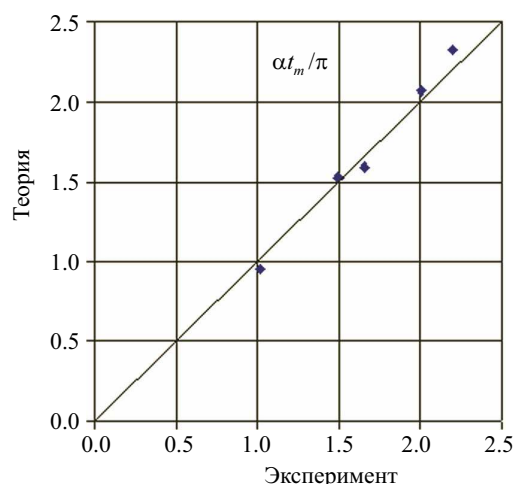


Рис. 5. Фаза перелета цилиндрического вихря по циклоиде, в которой формируется кольцевой вихрь. Теория и эксперимент. Прямая линия — точное совпадение теории и эксперимента

в широком диапазоне характеристик основного течения (числа Фруда и Рейнольдса) и параметров вязкого слоя для различного типа подстилающей поверхности (см. таблицу) подтверждает справедливость предлагаемой качественной модели трансформации коротких цилиндрических вихрей в кольцевые. Полученные данные могут быть полезны при верификации численных решений задачи в полной гидродинамической постановке.

6. ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ

Кольцевой вихрь, в зоне формирования (например, 5 на рис. 4), лежит в горизонтальной плоскости. Самоиндуцированное движение кольцевого вихря, скорость которого направлена по нормали к плоскости вихря, приводит к дополнительному смещению кольца выше верхней границы вязкого слоя $y = \frac{5}{3}\delta$ в область, где профиль скорости фонового течения почти однороден по вертикали. Взаимодействие кольцевого вихря с фоновым потоком приводит к быстрому развороту плоскости вихря из горизонтального положения в вертикальное. При обтекании потоком кольца возникает разность суммарной скорости на верхней и нижней части линии тока вокруг вихря. В результате возникает сила, опускающая переднюю часть кольца и поднимающую часть, расположенную ниже по течению. В вертикальном положении скорость самоиндуцированного движения направлена навстречу фоновому потоку: смещение по оси x замедляется. На рис. 6 зафиксированы четыре вихря в разных фазах (эксперимент № 1). Цифрой 1 показан цилиндрический вихрь в момент своего формирования у дна канала, цифрой 2 отмечен кольцевой вихрь в горизонтальной плоскости в момент формирования в фазе циклоиды $\alpha t_m = 2.1\pi$ в конце первого перелета вихря. Цифра 3 показывает два кольцевых вихря, расположенных в вертикальной плоскости. Диаметр этих вихрей существенно больше диаметра кольца в момент формирования. Дополнительное растяжение кольца (плоскость zy), обусловлено распределением давления на вихревое кольцо со стороны фонового потока. Вихри растягиваются, но сразу не разрушаются, они существуют длительное время $t \approx 0.12$ с (три кадра). По мере растяжения вихрей нарастают возмущения, которые хорошо видны на рисунке. Можно предположить, что эти возмущения приводят к разрушению вихрей. Если кольцевые вихри под углом подходили к свободной поверхности (эксперимент № 2), то перемещались вдоль по течению, а угол наклона уменьшался, пока вихрь не разрушался, как в численных работах [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получена оценка длины и диаметра опор короткого цилиндрического вихря как функция фазы перемещения вихря вдоль циклоидальной траектории в потоке со сдвигом скорости у дна канала. Расчет хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. Показано, что опоры короткого цилиндрического вихря смещаются навстречу друг к другу, что обусловлено самоиндуцированным движением вертикальных изгибов вихревой нити и влиянием подстилающей поверхности на концы опор. Получена оценка скорости

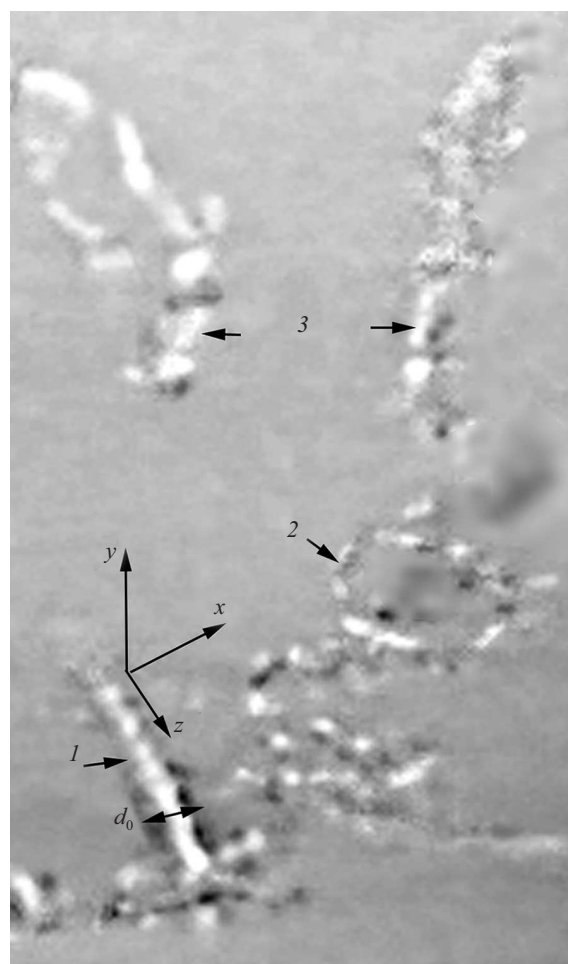


Рис. 6. Деформация кольцевого вихря в фоновом потоке. 1 — цилиндрический вихрь в момент формирования у дна канала, 2 — кольцевой вихрь сформирован в верхней точке циклоидальной траектории цилиндрического вихря, 3 — два кольцевых вихря, развернутые фоновым потоком в вертикальное положение, диаметр вихрей увеличился при воздействии фонового потока. Скорость фонового потока направлена вдоль оси x

смещения опор вдоль цилиндра навстречу друг другу. Хорошее согласие данных экспериментов и расчета подтверждает предложенную качественную модель в широком диапазоне характеристик фонового течения и параметров вязкого слоя.

3. Установлено, что при встрече опор формируется кольцевой вихрь из цилиндрического вихря и верхней части опор. Получено выражение для расчета фазы перемещения цилиндрического вихря по циклоидальной траектории, в которой формируется кольцевой вихрь, как функции длины начального вихря, отнесенной к толщине вязкого слоя. Расчет по полученному выражению близок экспериментальным данным.

4. Кольцевые вихри формируются в горизонтальной плоскости, поднимаются вверх за счет самоиндуцированного движения, разворачиваются фоновым потоком и занимают вертикальное положение так, что скорость кольца направлена навстречу скорости фонового течения. В этом положении фоновый поток, обтекая кольцо, растягивает его, создавая разность давления на внутренней и внешней части вихря. Нарастающие возмущения приводят к разрушению вихря.

5. Исследование широкого диапазона параметров фонового потока и вязкого слоя позволяет использовать полученные данные для сравнения с другими экспериментами и верификации численных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith C. R.* // Proceedings of the 8th Symposium of Turbulence, edited by J. L. Zakin and G. Patterson. University of Missouri–Rolla, Rolla. 1984. P. 58.
2. *Head M. R., Bandyopadhyay P. R.* // *J. Fluid Mech.* 1981. **107**. P. 297.
3. *Bandyopadhyay P. R.* // *Phys. Fluids.* 1980. **23**. P. 2326.
4. *Theodorsen T.* // Proc. of the Midwestern Conference on Fluid Mech. Ohio State University, Columbus, OH. 1952. P. 1.
5. *Adrian R. J.* // *Phys. Fluids.* 2007. **19**. N 4. 041301.
6. *Fiedler H. E., Fernholz H. H.* // *Prog. Aerosp. Sci.* 1990. **27**, N 4. P. 305.
7. *Liu J. T. C.* // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1989. **21**. P. 285.
8. *Cantwell B. J.* // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1981. **13**. P. 457.
9. *Novikov E. A.* // *Boundary-Layer Meteorology.* 1987. **38**, N 3. P. 305.
10. *Sotiropoulos F. Khosronejad A.* // *Physics of Fluids.* 2016. **28**, N 2. 021301.
11. *Волков П. Ю., Достовалова К. В., Еречев Д. А. и др.* // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. **37**, № 6. С. 834. (*Volkov P. Yu., Dostovalova K. V., Erechiev D. A. et al.* // *Izvestia. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2001. **37**, N 6. P. 769).
12. *Мельникова О. Н.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. **41**, № 5. С. 682. (*Mel'nikova O. N.* // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2005 **41**, N 5. P. 620.)
13. *Жмур В. В.* // *Океанология.* 1988. **XXII**. № 5. С. 709. (*Zhmur V. V.* // *Oceanology.* 1988. **XXIII**. N 5. P. 709.)
14. *Алексеев С. В., Куйбин П. А., Окулов В. Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 2003.
15. *Lamb H.* *Hydrodynamics.* Cambridge University Press. 1932.
16. *Cheng M., Lou J., Luo L.-S.* // *J. Fluid Mech.* 2010. **660**. P. 430.
17. *New T. H., Shi S., Zang B.* // *Experiments in Fluids.* 2016. **57**, N 6. P. 109.

Transformation of a Cylindrical Vortex Generated in a Viscous Layer into a Vortex Ring

O. N. Melnikova^a, K. V. Pokazeev^b

Department of Physics at Sea and Bed Flows, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru.

The interaction of a short cylindrical vortex elongated along the transverse coordinate with a shear flow near a solid surface is considered. A cylindrical vortex with its ends lowered to the bottom of the channel is shown to turn into a vortex ring. The obtained qualitative model is verified by experiment.

Keywords: generation of cylindrical vortices, mass vortices in a shear flow, viscous layer, vortex interaction, vortex stability, horseshoe vortices.

PACS: 47.35.Bb, 92.10.Hm.

Received 05 June 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2019. **74**, No. 1. Pp. 77–83.

Сведения об авторах

1. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: olamel@yandex.ru.
2. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.