

УДК 532.526.75.013.4

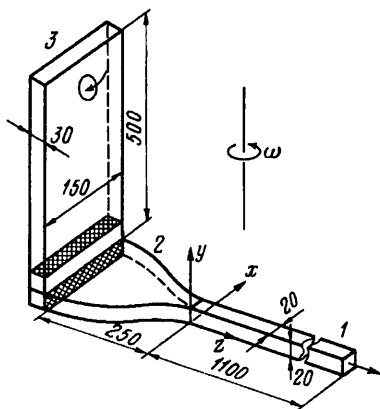
© 1996 г. А. В. КУЗЬМИНСКИЙ, Е. М. СМИРНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ТЕЧЕНИИ ПО ДЛИННОМУ КВАДРАТНОМУ КАНАЛУ, ВРАЩАЮЩЕМУСЯ ВОКРУГ ПОПЕРЕЧНОЙ ОСИ

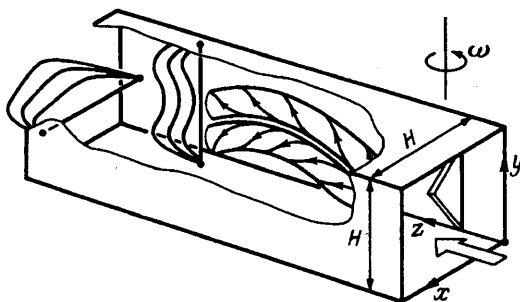
Изложены результаты экспериментального исследования бифуркационных явлений в ламинарном течении по вращающемуся квадратному каналу длиной около 50 калибров. Проведено сопоставление с известными из литературы результатами численного моделирования бифуркаций развитого стационарного течения. Построена карта стационарных и нестационарных режимов течения. Исследовано влияние искусственно генерируемых входных возмущений на условия возникновения продольно ориентированных вихревых структур у стороны повышенного давления каналов меньшей длины.

Полностью развитое по продольному направлению ламинарное течение в квадратном канале, вращающемся вокруг поперечной оси, изучалось численными методами многими авторами и, в частности, в [1, 2]. Определяющими безразмерными параметрами данного течения являются число Рейнольдса $Re = W_m H / \nu$ и число вращения $K = \omega H / W_m$, где H — длина стороны поперечного сечения канала, W_m — среднерасходная скорость, ω — угловая скорость вращения. Действие силы Кориолиса в первичном режиме (основном течении) обуславливает развитие поперечного течения в виде пары вихрей с зеркальной симметрией относительно срединной плоскости, перпендикулярной оси вращения. В [1, 2] было установлено, что при переходе на плоскости (Re, K) через определенную границу оказывается возможным получать численное решение, качественно отличающееся от того, которое описывает первичный режим. Характерным признаком нового решения является пара продольно ориентированных вихрей, направление циркуляции в которых противоположно основному поперечному движению. Переход к течению с дополнительной парой вихрей регистрировался также в экспериментах [3] при наблюдении потока на расстоянии 17,5 калибров от входа в канал. Несмотря на кажущуюся согласованность упомянутых расчетных и опытных результатов, к ним следует относиться критически по крайней мере по двум причинам. Во-первых, в [1, 2] для сокращения времени вычислений в постановку задачи изначально вводилось предположение о зеркальной симметрии течения. Хорошо известно, однако, что допущения такого рода могут кардинальным образом изменять характеристики устойчивости возможных режимов реального движения. В [4, 5] это показано на примере течения в искривленном канале, которое имеет много общих черт с течением по вращающемуся каналу. Во-вторых, в экспериментах [3] длина канала была недостаточной для того, чтобы с уверенностью можно было исключить влияние возмущений, возникающих при повороте потока на входе в канал, на реализацию того или иного режима течения в месте наблюдения за потоком.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментального исследования бифуркационных явлений в течении по вращающемуся квадратному каналу значительно большей длины, чем в предыдущих экспериментах [3]. Исследуется также влияние искусственно генерируемых входных возмущений на условия возникновения продольно ориентированных вихревых структур у стороны повышенного давления каналов относительно небольшой длины.



Фиг. 1



Фиг. 2

1. Экспериментальное оборудование. Вращающаяся часть экспериментальной установки монтировалась на горизонтально расположенном металлическом диске диаметром 700 мм. На диск устанавливалась металлическая рама, на которой располагались: рабочий канал с входным и выходным устройствами, фотокамера, импульсный источник света с оптическими элементами, электронная аппаратура для реализации метода водородных пузырьков и балансирующие грузы. Диск с установленными на нем элементами приводился во вращение электродвигателем постоянного тока через понижающий редуктор. Для получения широкого диапазона угловых скоростей и обеспечения стабильности вращения использовались два электродвигателя: первый вращал диск с угловой скоростью от 0,06 до 0,6 рад/с, второй — от 0,4 до 6 рад/с. Относительная погрешность поддержания угловой скорости не превышала 2%.

Рабочей жидкостью служила водопроводная вода, из которой предварительно удалялся растворенный газ. Во вращающуюся часть установки вода поступала через закрепленный сверху переходный узел, а отводилась через полый вал и нижний переходный узел. Такая организация подвода позволяет иметь относительно небольшой уровень абсолютного давления в канале и облегчает борьбу с утечками при малых расходах. Вода циркулировала по гидравлической системе с автоматической подкачкой в напорный бак, расположенный на высоте 8 м от уровня рабочего участка. Расход воды, протекающей через рабочий участок, определялся в неподвижной системе по перепаду давления на мерных диафрагмах. Относительная погрешность определения или поддержания расхода не превышала 2%. Температура воды измерялась с погрешностью 0,1° С по показаниям термометра, установленного на выходе из нижнего переходного узла.

Рабочий канал имел квадратное сечение 20 × 20 мм и длину 1100 мм; ось канала располагалась в горизонтальной плоскости. На фиг. 1 изображено устройство, использовавшееся для формирования течения перед входом в рабочий канал 1. Входное устройство состояло из двух жестко скрепленных частей: плоского конфузора 2 со степенью поджатия 7,5 и вертикально ориентированного канала 3 сечением 30 × 150 мм. Около поворота, выше и ниже по потоку, располагались две перфорированные пластины, схематично показанные заштрихованными сечениями. Коэффициент сопротивления каждой из пластин равнялся примерно 2, отверстия перфорации имели диаметр 5 мм. Вода поступала в подводящий канал 3 через верхнее отверстие диаметром 20 мм, а отводилась через штуцер того же диаметра, закрепленный на торцевой крышке рабочего канала.

Как и в предыдущих экспериментах [3, 6], для наблюдения за потоком и количественных измерений использовался метод водородных пузырьков [7]. Для получения пузырьков в поток перпендикулярно к оси канала вводились вольфрамовые проволочки (нити) диаметром 20 мкм. Анодом служил металлический выходной штуцер. При подаче периодического импульсного напряжения с вольфрамовой нити срываются и увлекаются течением ряды маркирующих частиц — водородных пузырьков. Эти ряды образуют временные линии течения, так как вследствие малости диаметра пузырьков эффекты релаксации и всплывания в полях массовых сил незначительны. Схематично временные линии при горизонтальном и вертикальном расположениях нитей показаны на фиг. 2. Регистрация временных линий производилась фотокамерой, вращающейся вместе с каналом. Выбранный диапазон изменения угловой скорости позволял вести и непосредственные наблюдения временных линий.

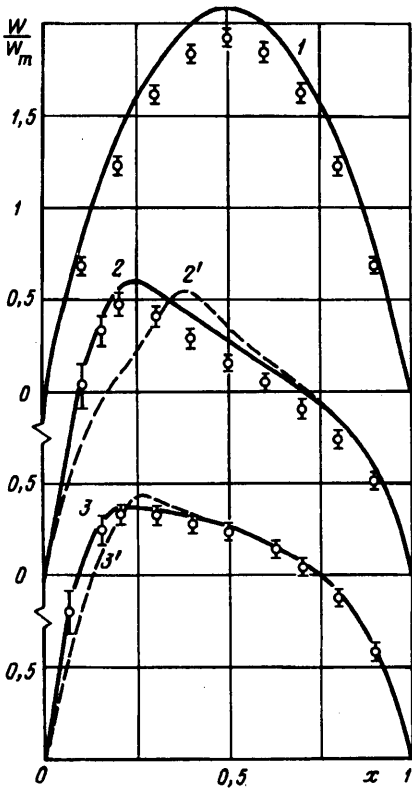
2. Измерения основного течения. Перед исследованием бифуркационных явлений были выполнены измерения развивающегося вдоль по каналу основного течения при нескольких наборах определяющих параметров Re , K . Эти измерения были направлены, в частности, на получение надежных свидетельств о достаточности длины канала для полного развития основного течения в условиях, близких к тем, при которых ожидалось развитие неустойчивостей.

Измерения выполнялись при расположении нити, генерирующей водородные пузырьки, в срединной горизонтальной плоскости (фиг. 2). От измерения к измерению нить вместе с регистрирующей аппаратурой сдвигалась вниз по потоку. При каждом измерении воспроизводился режим с требуемыми значениями Re и K и для заданного набора последних измерения выполнялись от 3 до 5 раз с целью уменьшения случайных погрешностей и исключения грубых ошибок. Положение нити определяется безразмерной координатой $z_w = z_w'/H$, отсчитываемой от места стыковки конфузора и рабочего канала (штрихом помечена размерная координата). Для исключения влияния возмущений, идущих от выхода из канала, последнее измерительное сечение $z_w = 45$ отстояло на 10 калибров от торцевой крышки с отводящим штуцером.

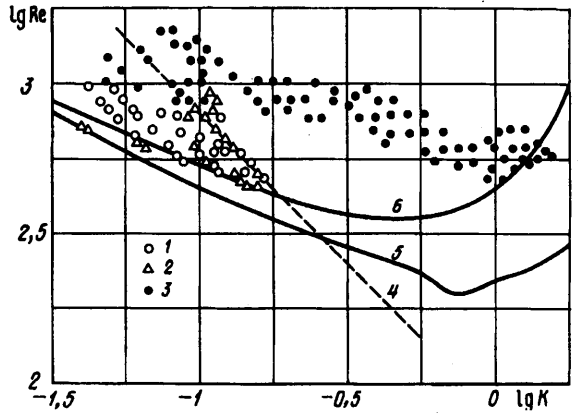
В качестве контрольного варианта рассматривалось течение, развивающееся в невращающемся канале при числе Рейнольдса, равном 500. Измерения показали, что поток полностью развивается на длине около 35 калибров. Сопоставим этот результат с известными из литературы данными. Определим длину участка развития как значение безразмерной продольной координаты $z_d = z_d'/H$, при которой скорость на центральной линии канала достигает 99% значения, соответствующего полностью развитому потоку. Для течения в невращающемся канале при однородном профиле скорости на входе согласующиеся между собой опыты [8] и расчеты [9] дают соотношение вида $z_d/Re = 0,075 \pm 0,05$. Используя данную формулу, при $Re = 500$ получим значение $z_d = 40$, близкое к полученной экспериментальной оценке, особенно если учитывать, что приспособление потока к условиям течения по рабочему каналу начинается еще в узкой части подводящего конфузора.

Измерения основного течения, развивающегося во вращающемся канале, были выполнены для нескольких вариантов с $Re < 800$ и $K < 2$. Полученные данные показали существенное сокращение участка установления поля скорости по продольной координате по сравнению со случаем невращающегося канала. Обобщающим результатом проведенного исследования является вывод о том, что при изменении параметра вращения K от 0,04 до 2,0 длина участка развития не превышает 45 калибров при всех $Re < 800$. Этот результат согласуется с данными работы [10], в которой развитие трехмерного ламинарного течения во вращающемся канале изучалось численным методом на основе параболизированной системы уравнений Навье — Стокса. Таким образом, выбранная длина рабочего канала оказывается достаточной для развития основного течения в указанной области значений числа Рейнольдса и параметра вращения. В следующем разделе будет показано, что именно в этой области наблюдаются наиболее интересные явления, связанные с развитием неустойчивостей вблизи стороны повышенного давления.

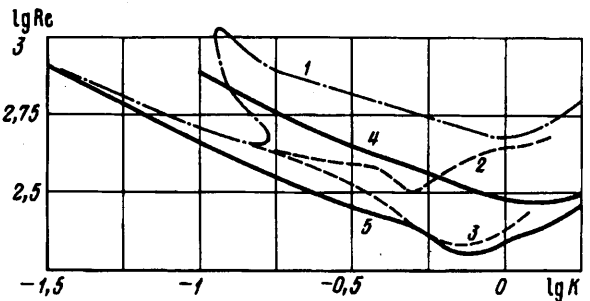
На фиг. 3 результаты измерений, полученные для $Re = 300$ при $z_w = 45$, сопоставляются с аналитическим решением для невращающегося канала (кривая 1) и численным расчетом, проведенным по методике [1] для $K = 0,5$ и 1,5 (кривые 2, 3). Результаты измерений показаны точками с вертикальными штрихами, отмечающими интервал случайных погрешностей. Для ненулевых значений параметра вращения приведено по два расчетных профиля. Это связано с тем, что в расчетной модели при принудительном наложении условий зеркальной симметрии относительно срединной плоскости вращающегося канала удается получить два метастабильных стационарных решения, одно из которых соответствует основному течению (сплошная кривая), а второе — течению с дополнительной парой вихрей у стороны повышенного давления (штриховая кривая).



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Сопоставляя опытные данные с расчетными, заключим, что в экспериментах реализовывалось основное течение. Типичные картины течения и изолинии продольной компоненты скорости, рассчитанные для основного течения и для течения с дополнительной парой вихрей, приводятся, например, в [1].

Опытные точки на фиг. 3 лежат несколько ниже расчетных кривых: максимальное расхождение наблюдается для течения в невращающемся канале и составляет величину около 10%. Это расхождение — следствие систематической погрешности метода измерений, которое обусловлено дефектом скорости в следе за нитью, генерирующей водородные пузырьки [7]. Для течения в инерциальных системах разработаны методики учета этих погрешностей. Для случая же течения во вращающихся каналах вопрос остается открытым, так как вращение сильно изменяет характеристики следа за нитью. С ростом интенсивности вращения результаты опытов и расчетов сближаются. Последнее наблюдение позволяет заключить, что вращение способствует более быстрому затуханию дефекта скорости в следе за генерирующей нитью.

3. Неустойчивости и карта режимов. Настоящие эксперименты по наблюдению за развитием неустойчивостей проводились при поддержании $\omega = \text{const}$ и постепенном уменьшении или увеличении расхода протекающей по каналу жидкости. Выраженных гистерезисных явлений при этом не наблюдалось. Проволочка, генерирующая водородные пузырьки, располагалась на расстоянии $z_w = 45$ в плоскости с безразмерной координатой $x = 0,035$ при отсчете от стенки с повышенным давлением (фиг. 2). Переход к течению с дополнительной парой вихрей определялся по возникновению характерного провала на временных линиях, который отражает местное уменьшение продольной скорости из-за конвективного

выноса низкоскоростных пристеночных слоев внутрь потока, осуществляемого развивающимися вихрями (фиг. 2).

Обобщение экспериментальных данных представлено на фиг. 4. Опытные точки 1 соответствуют режимам с постоянно наблюдаемыми, практически стационарными провалами временных линий. В этих режимах линия, соединяющая центры провалов на последовательных временных линиях, ориентирована вдоль канала; в большинстве случаев она слабо искривлена: радиус кривизны по крайней мере на порядок превосходит ширину канала. Искривление рассматриваемой линии означает, что течение не является строго однородным по продольному направлению и симметричным относительно срединной плоскости. Точки 2 отмечают случаи, в которых провалы время от времени исчезали и вновь появлялись в наблюдаемом месте потока. Возможная причина этой слабой нестационарности заключается в небольших колебаниях угловой скорости с периодом, много большим характерного времени $t_c = H/W_m$. Точки 3 соответствуют существенно нестационарным режимам с сильными колебаниями линии, соединяющей центры провалов. Эти колебания имеют вид волны, бегущей вдоль канала. Грубо длину волны можно оценить величиной порядка ширины канала. При $K > 1$ возникали две пары дополнительных вихрей, а длина волны бегущих колебаний заметно возрастала.

Опытные точки, соответствующие основному течению, на фиг. 4 не показаны. Экспериментальный предел устойчивости основного течения определяется линией, огибающей снизу все изображенные опытные точки для охарактеризованных выше режимов 1—3.

Переходя к обсуждению полученных результатов, заметим прежде всего, что изменение вида бифуркации исследуемого течения происходит при значении числа Тейлора $Ta \equiv ReK \approx 80$ (штрихпунктирная прямая 4). Для $Ta < 80$ развитие неустойчивости основного течения приводит к установлению нового стационарного течения или же течения с периодом колебаний, значительно превосходящим характерное конвективное время t_c . При $Ta > 80$ предел устойчивости основного течения резко повышается, а потеря устойчивости связана с переходом к автоколебательному режиму с периодом, сравнимым с характерным временем t_c .

Интересно сопоставить полученные результаты с данными численных исследований бифуркационных явлений в рассматриваемом течении [1, 2]. Расчеты [1, 2] проведены с принудительным наложением условия зеркальной симметрии течения относительно срединной плоскости. Кривая 5 заимствована из [1] и показывает границу, ниже которой решение с дополнительной парой вихрей не существует. Кривая 6, построенная с использованием данных [2], отмечает границу, выше которой основное течение в принятой расчетной модели абсолютно неустойчиво. В полосе между кривыми 5, 6 возможно получить решения обоих типов. Видно, что при $Ta < 80$ результаты настоящих экспериментов и расчетов [1, 2] удовлетворительно согласуются между собой. При $K > 1$ экспериментальный предел устойчивости основного течения также близок к расчетной кривой 6. Последний факт следует рассматривать как удивительный: в расчетной модели использовалось предположение о стационарности течения, в то время как в реальности развивающееся новое течение является нестационарным.

На полученной карте режимов развитого течения во вращающемся канале имеется обширная область, в которой реальное основное течение еще сохраняет устойчивость, а течение, рассчитываемое в рамках постановок, принятых в [1, 2], абсолютно неустойчиво. Причина наблюдающихся расхождений лежит, очевидно, в ограничивающих допущениях расчетной модели: в предположениях о стационарности течения, неизменности поля скорости по продольной координате и зеркальной симметрии течения относительно срединной плоскости. Симметричное течение с дополнительной парой вихрей, получаемое в расчете, может быть неустойчивым относительно несимметричных возмущений, включающих поперечные перемещения вихрей. В реальности такие перемещения сочетаются

с периодическими изменениями поля скорости по продольному направлению в виде стоячей или бегущей волны.

4. Влияние входных возмущений. Известно, что входные возмущения могут активизировать или, наоборот, подавлять генерацию возмущений, развитие которых в конечном итоге приводит к смене режима течения. При изложении результатов предыдущего раздела неявно предполагалось, что расстояние от входа в канал до места наблюдения достаточно не только для установления основного течения, но и для развития (или затухания) вторичных режимов. Последнее, однако, нуждается в специальной проверке.

При неизбежных ограничениях на длину вращающегося канала экспериментальной установки желаемую проверку удобнее всего осуществлять, сильно изменяя условия течения на входе в канал и сопоставляя затем результаты, полученные для разных входных условий. В экспериментах, представляемых в настоящем разделе, условия на входе были изменены так, чтобы искусственно возбудить дополнительную пару вихрей у стороны повышенного давления. Оказалось, что удобным способом возбуждения вихрей является установка локального выступа, изготовленного в виде равнобедренного треугольника (фиг. 2). В опытах выступ перемещался вдоль по каналу и в каждом случае координата z_w , определяющая положение области наблюдений, отсчитывалась от места расположения выступа. Наблюдения, аналогичные представленным в предыдущем разделе, показали, что при $z_w \geq 40$ результаты практически совпадают с теми, которые даются точками 1—3 на фиг. 4. Вместе с тем наблюдения, проведенные при $z_w < 20$, указывают на сильные изменения в карте режимов.

На фиг. 5 кривая 1 построена как огибающая опытных точек на фиг. 4. Кривые 2, 3 получены для $z_w = 6,5; 2,65$ и отмечают границу, при переходе через которую оказывалось возможным наблюдать провалы на временных линиях, характерные для течения с дополнительной парой вихрей. Кривая 4 заимствована из [3], где представлены результаты, визуальных наблюдений за потоком на расстоянии $z_w = 17,5$, отсчитываемом от плохо организованного входа с резким поворотом потока. Наконец, кривая 5, как и на предыдущей фигуре, показывает полученную в [1] расчетную границу, ниже которой течение с дополнительной парой вихрей реализовываться не может.

В целом представленные на фиг. 5 данные позволяют заключить, что сильными локальными, в частности, входными, воздействиями оказывается возможным возбудить дополнительную пару вихрей при значениях числа Рейнольдса, лежащих существенно ниже границы устойчивости основного течения в длинном канале, однако возбужденные таким образом вихри затухают по мере продвижения вдоль по каналу. Примечательно вместе с тем, что в опытах не удалось возбудить дополнительную пару вихрей в области, лежащей ниже расчетной кривой 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Е. М. О бифуркации развитого течения по прямоугольным каналам, вращающимся вокруг поперечной оси // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 5. С. 27—32.
2. Khesghi H. S., Scriven L. E. Viscous flow through a rotating square channel // Phys. Fluids. 1985. V. 28. № 10. P. 2968—2979.
3. Кузьминский А. В., Смирнов Е. М., Юркин С. В. Продольно ориентированные ячеистые структуры типа вихрей Тэйлора — Гертлера на стороне повышенного давления вращающихся каналов // ПМТФ. 1983. № 6. С. 129—134.
4. Winters K. H. A bifurcation study of laminar flow in a curved tube of rectangular cross-section // J. Fluid Mech. 1987. V. 180. P. 343—369.
5. Jayanti S., Hewitt G. F. A numerical study of bifurcation in laminar flow in curved ducts // Intern. J. Numer. Meth. Fluids. 1992. V. 14. P. 253—266.
6. Смирнов Е. М., Юркин С. В. О течении жидкости по вращающемуся каналу квадратного поперечного сечения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 6. С. 24—30.

7. Шрауб, Клайн, Ранстэдлер, Генри, Литтелл. Использование пузырьков водорода для количественного изучения изменяющихся во времени полей скоростей в низкоскоростных водяных потоках//Тр. Америк. о-ва инж.-мех. Сер. D. Теорет. основы инж. расчетов. 1965. Т. 87. № 2. С. 192—211.
8. Филиппов В. М. Экспериментальное исследование развития ламинарного течения в каналах квадратного сечения//Аэромеханика. М.: Наука, 1976. С. 217—229.
9. Han L. S. Hydrodynamic entrance lengths for incompressible laminar flow in rectangular ducts//Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1960. V. 27. № 3. P. 403—409.
10. Овчинников О. Н., Руколайне А. В. Начальный участок в канале, вращающемся относительно поперечной оси//Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 5. С. 41—46.

Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
13.II.1995