

УДК 532.5.013.4

© 1991 г.

В. Н. КАЛАШНИКОВ, М. Г. ЦИКЛАУРИ

УПОРЯДОЧЕННЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКОГО ПОТОКА В СКРЕЩЕННЫХ ЩЕЛЯХ

В последнее время в связи с исследованиями динамического двойного лучепреломления полимерных растворов проявляется интерес к двумерному ламинарному течению жидкости в щелевых каналах равной ширины, пересекающихся так, что в плане они образуют прямоугольный крест. Одинаковые по расходу потоки поступают навстречу друг другу через пару противостоящих ветвей креста, разворачиваются в центральной части и удаляются через две другие ветви. Такое течение было предложено в работе [1], а затем многократно использовалось в последующих работах (см., например, [2, 3] и имеющиеся там ссылки).

Интерес к плоскому потоку в крестообразном канале объясняется возможностью технически простой реализации контролируемого чистого сдвига со значительными скоростями деформации растяжения. Деформация чистого сдвига локализуется в окрестности центральной оси креста, на которой скорость жидкости равна нулю. По этой причине такой поток является удобным инструментом для исследования динамического поведения рассеянных в жидкости деформируемых включений, в частности макромолекул полимера или их агрегатов. Ограничением в повышении контролируемой скорости деформации растяжения и естественным пределом в использовании для указанной выше цели подобного течения является его неустойчивость, которая экспериментально исследовалась в данной работе.

При малых числах Рейнольдса наблюдается плоское стационарное течение. Однако если число Рейнольдса достигает некоторого критического значения, происходит смена устойчивости и возникает сложное трехмерное течение, которое также является стационарным. Это течение имеет пространственную периодичность. Оно состоит из вертикального ряда вихрей, имеющих поочередно меняющееся направление вращения. Вихри перемежаются струями, поочередно формирующимися то в одной, то в другой входной щели. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса наступает момент, когда трехмерное течение теряет стационарность и возникают колебания.

1. Методика исследования. Для экспериментального исследования устойчивости плоского ламинарного течения в скрещенных щелях использовались две ячейки. У первой ячейки ширина щелей $d=0,4$ мм, высота $h=105$ мм ($h/d=262$), у второй — $d=0,8$ мм, высота $h=26$ мм ($h/d=32$). Длина ветвей креста в обоих случаях 30 мм.

Ячейки изготовлялись из оргстекла путем фрезерования отдельных элементов с последующей их склейкой. Для достижения равномерности подвода и отвода жидкости щелевые каналы начинались и заканчивались широкими камерами, снабженными сотовыми выпрямителями.

Визуализация течения осуществлялась путем ввода через медицинские иглы подкрашенной жидкости. Иглы устанавливались в расширениях перед входами в щелевые каналы. Имелась возможность перемещения игл по высоте. В некоторых случаях, чтобы разобраться в деталях картины

течения, трассирование производилось струйками, подкрашенными в различные цвета. Проводились также визуализационные опыты, в которых в одну из входных ветвей подавалась полностью окрашенная жидкость, а в противоположную — чистая.

Наблюдение и фотографирование осуществлялось как сбоку, так и сверху. Наблюдение сверху проводилось с помощью микроскопа в проходящем свете. В этом случае ячейки, снабженные оптическими стеклами в крышках каналов, устанавливались на предметном столике микроскопа.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода, подаваемая из напорной емкости. Сечение напорных шлангов и их число подбирались так, чтобы течение в них было ламинарным в исследуемом диапазоне расходов, а ввод жидкости равномерным. Расход жидкости измерялся с помощью секундомера и мерных цилиндров. Измерялась ее температура. Число Рейнольдса определялось согласно соотношению

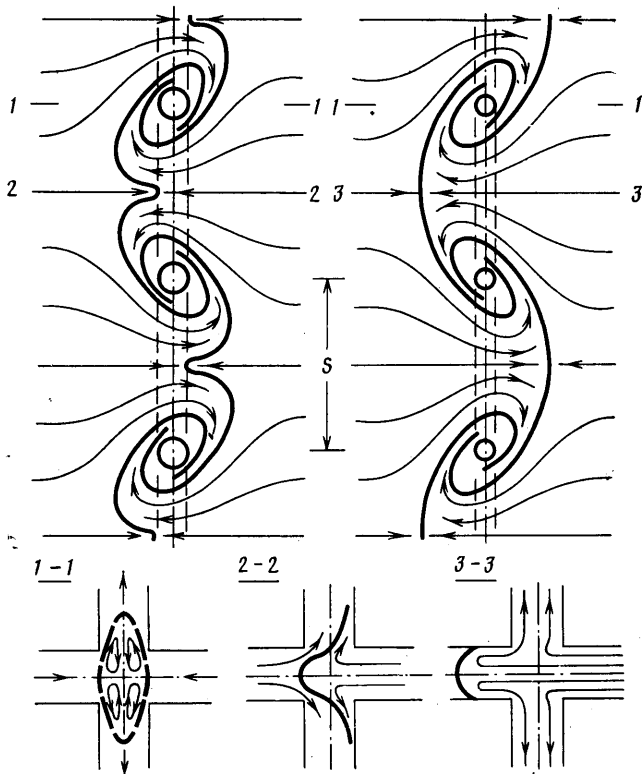
$$\text{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{q}{2hv}$$

Здесь w — средняя скорость в щелевом канале, q — полный расход через обе вводные ветви, ν — кинематический коэффициент вязкости.

Кроме визуальных наблюдений и фотографирования проводилось определение коэффициента сопротивления в зависимости от Re . Для этого пьезометрами измерялся перепад давления между входами в ячейку и выходами из нее.

2. Результаты опытов. Если число Рейнольдса невелико, то течение в ячейке со скрещенными щелями ламинарное и двумерное. Потoki, поступающие из противостоящих входных ветвей, в выходных каналах разделены плоскостью, совпадающей с вертикальной плоскостью симметрии этих каналов. Это легко наблюдать, подавая в один из входных щелевых каналов окрашенную жидкость, а в другой — чистую. Сверху можно видеть, что линия раздела окрашенной и неокрашенной жидкости лежит в середине между стенками выходных каналов. Линии тока параллельны крышке и дну, закрывающим крестообразную щель сверху и снизу, что легко установить, прослеживая распространение подкрашенной жидкости, вводимой через иглу на том или другом уровне у входа. Соответствующий этой картине течения коэффициент сопротивления пропорционален Re^{-1} .

Если, повышая расход, постепенно увеличивать число Рейнольдса, то при некотором его значении поток в результате неустойчивости перестраивается и становится трехмерным. Кривая коэффициента сопротивления после перестройки течения уже не следует зависимости const/Re — она отклоняется вверх от нее. При понижении расхода восстановление первоначальной двумерной картины течения происходит при меньшем значении числа Рейнольдса. Такой гистерезис наблюдается в обоих исследованных ячейках, однако значения критических чисел Рейнольдса различны для разных ячеек. Значения критических чисел Рейнольдса для ячейки большей высоты составляют примерно 55 и 43 при повышении и понижении Re соответственно. Для ячейки малой высоты они на 30% меньше. Причины этого факта до конца не ясны. По-видимому, различия в критических значениях Re в разных ячейках объясняются влиянием горизонтальных стенок, т. е. вкладом краевых эффектов. Возможно также, что они связаны с погрешностями в изготовлении каналов и сотовых выпрямителей, из-за которых начальные возмущения потоков оказались различными в использованных ячейках.



Фиг. 1

Возникающее в результате неустойчивости трехмерное течение требует особого рассмотрения. Это симметричное относительно вертикальной плоскости симметрии входных щелей стационарное ламинарное течение сложной упорядоченной структуры, элементы которой периодически повторяются по высоте. Пояснить основные черты этого течения и изменения, происходящие с изменением числа Рейнольдса, поможет фиг. 1, на которой изображена составленная на основе визуализации схематическая картина линий тока. В верхней части фигуры представлены линии тока в вертикальной плоскости симметрии течения. Они образуют своеобразный повторяющийся с периодом $2s$ узор. Штриховыми линиями отмечено положение поперечного сечения выходных щелей. Левая схема относится к течению в интервале чисел Рейнольдса от критического значения до $Re \approx 90$, правая — к $Re \geq 90$.

Сечения, приведенные в нижней части фиг. 1, схематически иллюстрируют некоторые черты потока в плане. Поперечные масштабы потока для удобства изображения увеличены. Линии тока, лежащие на поверхности, отделяющей один входной поток от другого, выделены на схемах угловыми линиями.

В результате неустойчивости на пересечении щелей возникает ряд вихренообразных вихрей, имеющих чередующиеся противоположные направления вращения. Оси вращения вихрей горизонтальны и лежат в вертикальной плоскости симметрии выходных каналов на расстоянии s друг от друга. Поверхность вихря непроницаема для линий тока. Вихри представляют собой застойные области. Вращательное движение жидкости быстро затухает в направлении выходов. Поэтому на оси вихря реа-



Фиг. 2

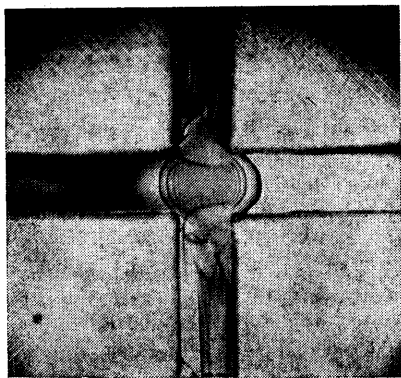
лизуются градиенты давления, направленные против выходных потоков к центру креста. Эти градиенты приводят к возникновению рециркуляционного течения. На фиг. 1 в вертикальных сечениях границы вихрей отмечены окружностями. В плане (сечение 1-1) штрихами для простоты показаны линии тока в вихре без учета окружающей составляющей скорости.

Вследствие того что вихрь представляет собой рециркуляционную застойную область, частицы примеси нейтральной плавучести, попав в вихрь, начинают вращаться на одном месте, а не сносятся потоком в выходные каналы. Такая ситуация с загрязняющими жидкость частицами неоднократно наблюдалась под микроскопом при проведении опытов. Чтобы удалить частицу потоком из поля зрения, нужно было, уменьшив расход, перейти к плоскому ламинарному течению.

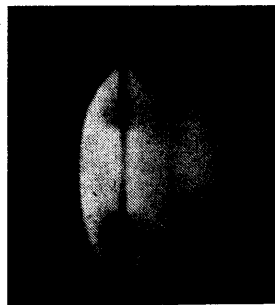
О расположении и форме рециркуляционной застойной области можно судить по результатам опыта со струйкой подкрашенной жидкости, подаваемой через иглу на вихрь. Если в определенный момент резко прекратить подачу краски, то еще некоторое время под микроскопом наблюдается слабоокрашенная жидкость в вихре, поскольку удаление краски из застойной области происходит достаточно медленно.

В промежутках между вихрями располагается ряд струй. Линии тока здесь, прежде чем развернуться и попасть в выходные ветви, проникают на некоторую глубину в противоположный входной канал, образуя характерные «языки». Струи формируются по высоте поочередно то в одном, то в другом входном канале. По этой причине выходные потоки состоят из слоев, границы которых лежат на уровне центров вихрей. Каждый из слоев состоит из жидкости, поступившей только из одной входной ветви ячейки. Поэтому если один из входных потоков полностью окрасить, а второй оставить чистым, то оба выходных потока приобретут полосатую окраску, что можно видеть на фотографиях фиг. 2, на которых запечатлены сбоку выходные потоки в высокой ячейке: *a* — $Re=64$, *б* — 141.

Имеется некоторое различие течений при $Re \leq 90$ и $Re \geq 90$. При $Re \geq 90$ между каждой парой вихрей в выходные щели проходит жидкость, поступающая лишь из одной входной ветви, тогда как при $Re \leq 90$ наблюдается частичный прорыв жидкости также из другой входной ветви (см. схему фиг. 1). Вследствие этого окраска выходных потоков на снимках фиг. 2 различна. На фиг. 2, *a* в середине широкой светлой полосы наблю-



Фиг. 3



Фиг. 4

дается тонкая темная полоса, а в середине темной — тонкая светлая. Тонкие полосы в середине широких полос отсутствуют на фиг. 2, б.

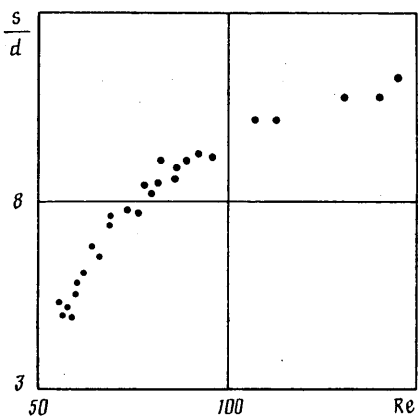
Прорыв тонкой струи жидкости сквозь противонаправленную широкую можно наблюдать в опыте с вводом через иглу окрашенной жидкой нити, натекающей на центральную часть языка широкой струи. Подкрашенная жидкая нить при $Re \geq 90$ разделяется на две ветви, охватывающие сверху и снизу язык. При $Re \leq 90$ происходит разделение на три части. Возникает характерный трезубец, в котором центральное ответвление соответствует жидкости, формирующей тонкую прослойку в выходных каналах.

Близкие к вихрям линии тока разворачиваются вверх и вниз и навиваются на вихри, прежде чем покинуть пространство пересечения щелей. Вниз по потоку в выходных каналах эти линии постепенно подтягиваются к горизонтальным плоскостям, на которых лежат оси вихрей и которые разграничивают жидкость, поступившую из разных входных щелей.

На фиг. 3 приведена фотография вихря с окружающей его вращающейся жидкостью. Визуализация осуществлена подкрашенной жидкостью, подаваемой через иглу на входе в левый канал. На снимке можно видеть слои жидкости, охватывающие вихрь. Если на один и тот же вихрь подавать из левого входного канала струйку краски одного цвета, а из правого — другого цвета, то в соответствии с представленной на фиг. 1 схемой течения наблюдается чередование цветов охватывающих вихрь слоев жидкости.

Поворот в вертикальной плоскости крайних в формируемых струях линий тока вокруг вихревых застойных областей можно наблюдать при полном окрашивании жидкости одного из входных потоков. В этом случае сбоку, в конце входного канала с окрашенной жидкостью перед пересечением можно видеть области неокрашенной жидкости, языками прорывающейся из противоположного канала. Внутри себя эти области содержат по два пятна, образованных линиями тока окрашенной жидкости, охватывающими вихри. Фотография одной из таких областей приведена на фиг. 4. Окрашенная жидкость подается слева. Вертикальная черная полоса в середине снимка соответствует ребру, образованному стенками двух соседних каналов. Слева от этой линии — действительное изображение, справа — его отражение от поверхности выходного канала.

С ростом числа Рейнольдса расстояние между вихрями возрастает. На фиг. 5 приведены экспериментальные данные об относительном расстоянии между осями соседних вихрей s/d в зависимости от числа Re . Это расстояние определялось по полоскам в средней части выходных ка-



Фиг. 5

дит к образованию регулярных динамических структур более высокого порядка сложности по сравнению со структурами исходных потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Scrivener O., Berner C., Cressely R. et al.* Dynamical behaviour of drag-reducing polymer solutions // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 1979. V. 5. P. 475–495.
2. *Keller A., Odell J. A.* The extensibility of macromolecules in solution; a new focus for macromolecular science // *Colloid and Polymer Sci.* 1985. V. 263. № 3. P. 181–201.
3. *Farinato R. S.* Elongational flow-induced birefringence of polyacrylamide and poly(acrylamide-co-sodium acrylate) // *Polymer.* 1988. V. 29. № 12. P. 2182–2190.

Москва

Поступила в редакцию
19.VI.1990

налов высокой ячейки при подаче в одну из входных щелей окрашенной жидкости. Соответствующие величины, измеренные в ячейке малой высоты, лежат ниже. При $Re \leq 100$ (по измерению в высокой ячейке) течение стационарно, выше этого значения вихри начинают осциллировать. Амплитуда осцилляций невелика, поэтому влияние нестационарности слабо проявляется на картине распространения окрашенных полос в выходных каналах, зафиксированной на снимках фиг. 2.

Исследованное течение дополняет известный, сравнительно немногочисленный набор течений вязкой жидкости, неустойчивость которых приводит