



МНОГОЛИКИЕ

Вихри

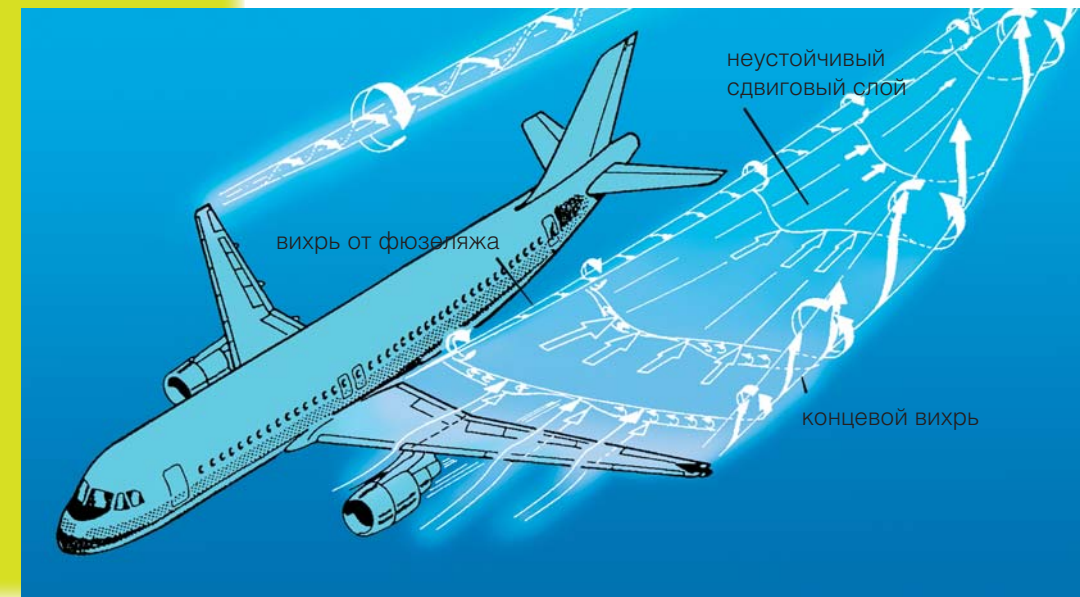
Завихрения — одна из основных форм движения текучей среды. Структура и размеры вихрей удивительно разнообразны. Они образуются в технических сооружениях, устройствах, механизмах, а также в реках, океанских течениях, атмосферных потоках... Вихри могут быть нашими помощниками, например, при создании подъемной тяги самолетов, но могут стать и врагами, порождая такие разрушительные явления огромной мощности, как ураганы и торнадо. У вихревых потоков много уникальных свойств...

Толковый словарь великорусского языка Даля дает много синонимов слова «вихрь», говорящих сами за себя: кружалка, заверть, ветроворот, столбовый ветер, даже чертова свадьба... Но для современного горожанина наиболее знакомым видом вихревого движения будет, пожалуй, водоворот, образующийся при вытекании воды из ванны.

Иногда вихревые следы можно наблюдать и на небе — вслед за летящим реактивным самолетом. Образуются вихри при обтекании самолетного крыла воздушным потоком. Кроме того, струи из реактивных двигателей самолета, фюзеляжные вихри (образующиеся в месте соединения крыла с фюзеляжем) вместе с так называемым *неустойчивым сдвиговым слоем* воздуха за крылом закручиваются в довольно мощные концевые вихри. Последние можно увидеть, например, за самолетом сельскохозяйственной авиации, летящим на низкой высоте и распыляющим через устройство под крыльями инсектициды, служащие своеобразными «маркерами» вихревого движения.

Образование вихрей при полете самолета. Поскольку давление воздуха на верхней стороне самолетного крыла меньше, чем на нижней, струя воздуха при обтекании конца крыла образует малые концевые вихри, диаметр которых намного меньше их длины. Другая пара вихрей образуется в месте соединения крыла с фюзеляжем. Все они вместе со струями из реактивных двигателей и неустойчивым сдвиговым слоем за крылом закручиваются в концевые вихри (*Deutsche Aerospace, Airbus, 1996*)

Концевые вихри от самолета сельскохозяйственной авиации, видные благодаря распыленным инсектицидам (*Welt am Sonntag, September 3, 2006*)



КРАВЦЕ Эгон — профессор, член Сената Немецкого аэрокосмического общества, директор (1973—1998 гг.) Аэродинамического института Рейн-Вестфальской технической высшей школы (RWTH) (Ахен, Германия). Лауреат премии Общества Макса Планка, почетный доктор Сибирского отделения РАН

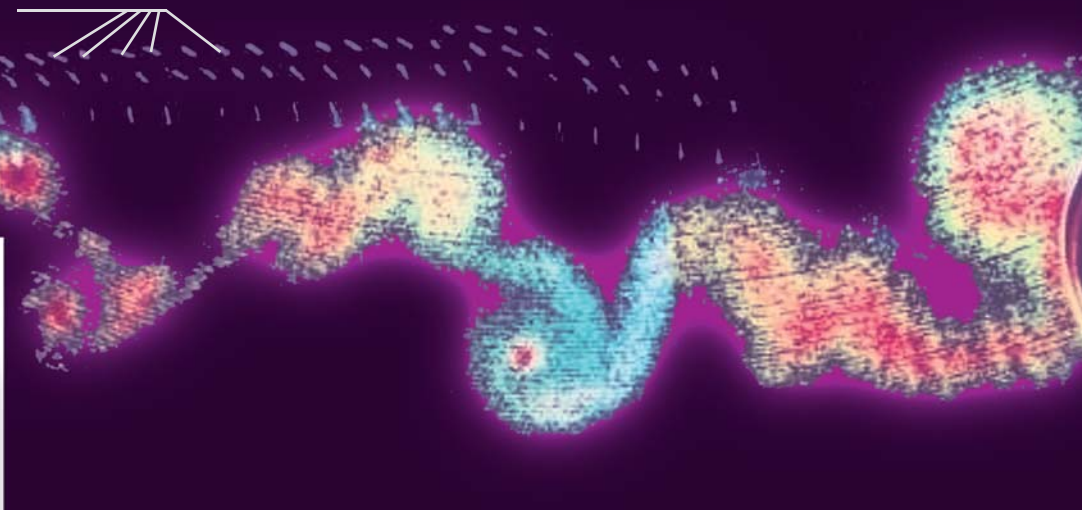


Следы от самолетов, летящих на большой высоте. След на нижнем снимке имеет вихревую структуру. Фото автора



Вихри за крылом аэробуса A340 (реактивного самолета с четырьмя двигателями) при заходе на посадку. Снимок сделан в направлении полета, конец крыла находится слева, фюзеляж — справа, гондолы двигателей находятся посередине. По расположению отображения шерстяных нитей можно заключить, что поток локально подходит к крылу. Вихри образуются на конце крыла и на стыке крыла и фюзеляжа, а также на кромке закрылков в посадочном положении. Снимок получен методом лазерной визуализации исследовательской командой фирмы Airbus (Deutsche Aerospace, Airbus, 1996)

отображение шерстяных нитей, прикрепленных к верхней стороне крыла



Следы в небе

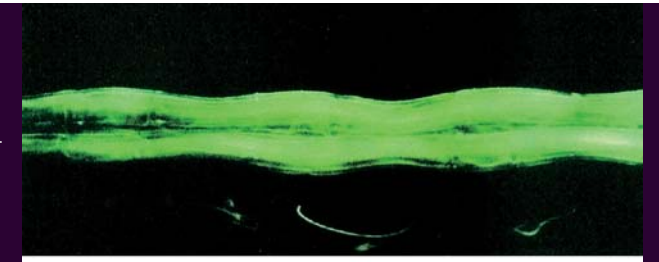
В вихревом следе, образующемся при обтекании воздушным потоком самолетного крыла, обычно присутствуют вихревые структуры неправильной формы, со множеством мелких вихрей с осями, ориентированными в направлении полета. Такие завихрения можно увидеть на снимках крыла самолета, полученных методом лазерной визуализации.

Концевые вихри за самолетом становятся видимыми благодаря отработанным газам реактивных двигателей при полете на крейсерской скорости на большой высоте. При сгорании в двигателе авиационного топлива (керосина) образуются двуокись углерода, водяной пар, окись азота и сажа. На тех высотах, где летают самолеты, температура низкая, поэтому пары воды конденсируются на частицах, образуя в результате различных физических процессов (замерзания, испарения, сублимации) микрокапли или микрокристаллы. Последние и вовлекаются в концевые вихри, в результате чего за самолетом появляются длинные белые конденсационные «шлейфы», которые часто можно видеть в ясном небе.

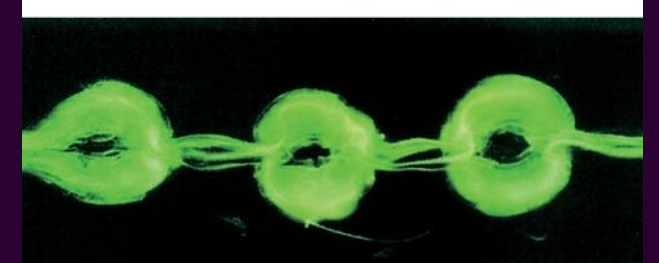
Как долго будет существовать такой след, зависит от многих факторов, главным образом от температуры, направления ветра и влажности воздуха. Иногда шлейф рассеивается через несколько минут, в некоторых же случаях срок его «жизни» достигает нескольких часов. Замечено также, что при определенных условиях конденсационный след распадается на структуры наподобие вихревых колец.

Это явление называют обычно *неустойчивостью Кроу* по имени американского ученого С. К. Кроу, который в 1970 г. впервые дал аналитическое описание начальных стадий этого процесса. Кроу показал, что взаимодействие двух концевых вихрей может приводить к усилению так называемых *возмущений вытеснения*, длина волны которых в осевом направлении обычно в несколько раз превосходит начальное расстояние между вихрями. Позднее, в 1977 г. французские исследователи Т. Льюк и С. Вильямсон исследовали это явление в лабораторном эксперименте, полностью подтвердив выводы Кроу.

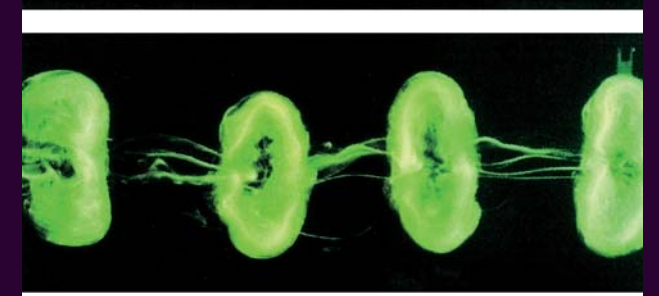
два исходных, слегка возмущенных, концевых вихря



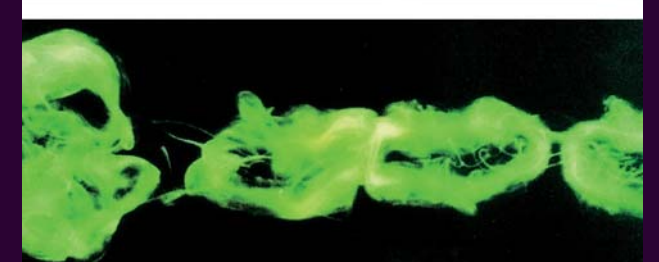
развитие вихревых колец, наклоненных к плоскости исходных концевых вихрей под углом около 45°



вихревые кольца изгибаются в овальные вихри, которые начинают вибрировать, периодически меняя направление главных осей



слияние кольцевых структур, которые начинают взаимодействовать друг с другом



Этапы взаимодействия типичных вихревых колец, приводящего к появлению вихревой структуры конденсационного следа самолетов.

Результаты лабораторного эксперимента (Th. Leweke, C.H.K. Williamson, Kluwer Academic Press, 1998)

направление преобладающего ветра

а

б

вихревое кольцо

направление потока

Атмосферные вихри за островом Александр Селкирк близ Чили (а). Эта фотография, сделанная со спутника, попала во многие газеты. (USGS/EROS DATA CENTER, NASA) Структура наблюдавшихся там вихрей, визуализированная впрыскиванием флуоресцентного красителя и освещенная в меридиональной плоскости (б). (G. Erhardt, 1979)

Смерч недалеко от оз. Констанц на юго-западе Германии, 1988 г. (H. Mueller, 1988)



Вихрь фон Кáрманна

В атмосфере можно наблюдать и другие вихри. Например, с помощью спутника «Landsat 7» была обнаружена так называемая *вихревая дорожка Кáрманна* — больших размеров, с подветренной стороны острова Александр Селкирк (архипелаг Хуан Фернандес), расположенного в Тихом океане примерно в 800 км на запад от Чили.

Венгерский ученый Теодор фон Карман был первым, кто в 1911 г. обнаружил образование особой последовательности вихрей при обтекании кругового цилиндра, ось которого перпендикулярна встречному потоку, и описал условия ее формирования.

В случае острова Александр Селкирк хочется отметить два момента. Во-первых, эта последовательность встречных завихрений никогда не была бы открыта без применения спутниковых технологий. Во-вторых,

удивляет то, что такой небольшой скалистый остров (его площадь составляет около 44 км², а вершина самой большой горы высотой 1319 м легко достигает облаков) спровоцировал образование столь огромной вихревой дорожки.

Вихревые дорожки Кармана продолжают изучать до сих пор, поскольку периодические выбросы подобных вихрей бывают настолько мощными, что могут вызвать колебания (*резонанс*) в самых разных объектах. Подтверждением их опасности служит разрушение таким вихрем в 1940 г. моста Такома-Нэрроуз (штат Вашингтон, США).

У вихревых дорожек может быть невероятное множество конфигураций. Для подтверждения приведем лишь один пример, а именно — исследование Г. Эрхард-

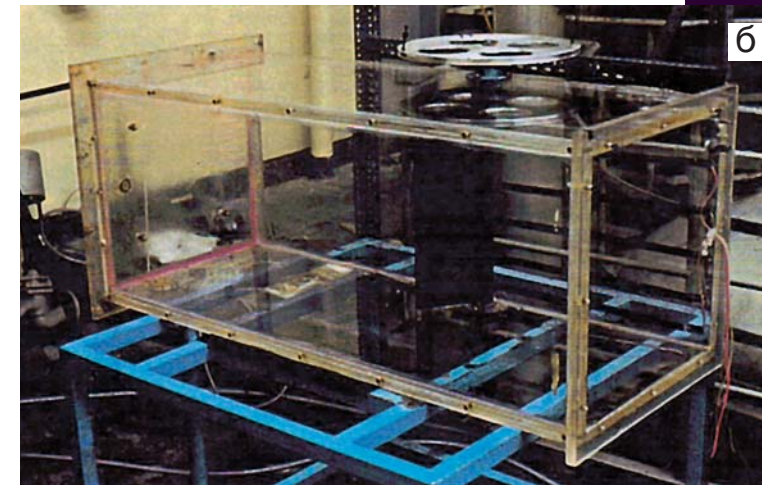
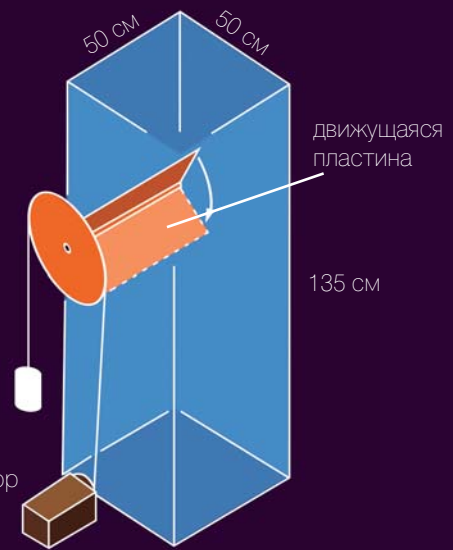


Схема экспериментальной установки для получения слабых вихрей (а). Эта же установка, но расположенная горизонтально (б) (Th. Leweke, 1990)

а

противовес

мотор



том из нашего Аэродинамического института (г. Ахен, Германия) в 1979 г. вихревых структур, образующихся при прохождении потока воздуха внутри и вокруг кольца, размещенного под прямым углом к потоку. Завихрения, идущие от внутреннего и внешнего краев такого кольца, представляют собой парные вихревые кольца, по форме похожие на облака на подветренной стороне острова Александр Селкирк. Очевидно, что размер кольца, измеряемый сантиметрами, совершенно не влияет на зарождение вихревой дорожки. Поэтому оно «работает» точно так же, как и остров, протяженность которого от одного побережья до другого составляет несколько километров.

Ураганы-убийцы

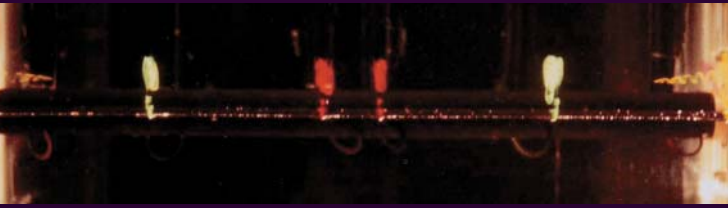
Хотя смерчи, циклоны, ураганы и торнадо не относятся непосредственно к предмету нашего рассмотрения, однако на определенном этапе своей «эволюции» они также могут рассматриваться как слабые вихри — до тех пор, пока не наберут силы и не перерастут в ураганы-убийцы, как их часто называют в США.

Небольшие воронкообразные облака время от времени образуются и над Европой — их можно видеть на снимках метеорологической службы. Воронки могут подниматься от земли до верхних слоев облаков. В слу-

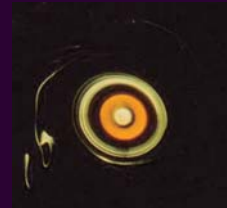
чаях, когда они разрастаются до урагана, мощность ветра внутри них может превышать триллион ватт! Появляясь в последние годы все чаще, ураганы-убийцы могут опустошать огромные пространства, как это произошло в 2005 г. в США, где в результате «налета» урагана «Катрина» был затоплен Новый Орлеан.

Малые вихри можно моделировать в лабораторных условиях подобно уже упомянутой вихревой дорожке Кармана. Так, в 1990 г. Т. Саваде и Т. Льюку, ученым Аэродинамического института, удалось получить слабые вихри в форме зарождающихся вихревых структур в стеклянном контейнере квадратного поперечного сечения, наполненном водой и дополненным пластиной, закрепленной на стенке контейнера. Начальные вихри получали, поворачивая пластину на определенный угол. Для визуализации потока в воду впрыскивали разноцветные красители с заднего края пластины в шести осевых направлениях. Поток фотографировали в двух освещенных плоскостях — параллельной и перпендикулярной оси завихрения.

На серии снимков, сделанных в «профиль», благодаря красителям хорошо видны все этапы зарождения, развития и, наконец, разрушения первоначально «тонкого» вихря вследствие индуцированного им осевого движения. Разрушение структуры потока в центре



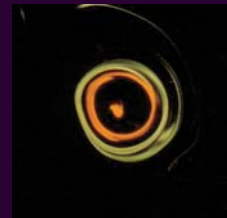
В начальной стадии вращения коричневый краситель образует конусы (вихри), а желто-зеленый краситель и красный — почти плоские диски прямо над задним краем пластины (обозначенным горизонтальной линией маленьких воздушных пузырьков



Начальная стадия вращения



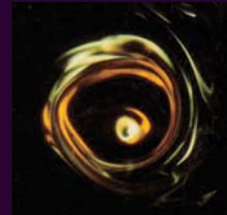
Вследствие понижения давления в центре развивающегося завихрения, возникает движение вдоль оси по спирали от боковых стенок к середине, на что указывают коричневые конусы



Внутреннее коричневое вихревое кольцо начинает сливаться с наружным желто-зеленым



Желто-зеленый конус почти достигает центральной линии. Рядом с плоскостями впрыска формируются малые вихри в виде небольших конусов



Структура потока в центре завихрения разрушается



Желто-зеленый конус достигает центральной линии и поток отскакивает назад; вершины коричневого и желто-зеленого конусов также перемещаются к боковым стенкам. Противоток вызывает расширение конусов и разрушает их осевую симметрию

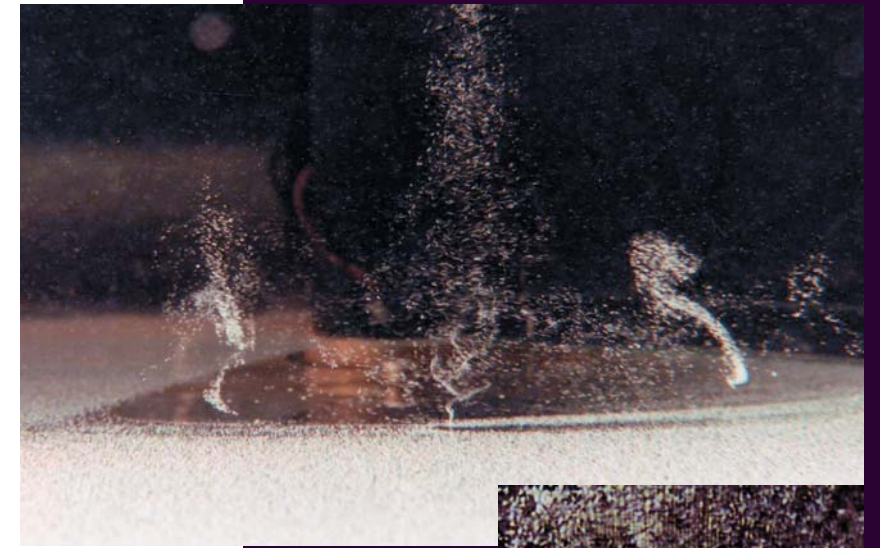
а б



Вихрь разрушается вследствие индуцированного им осевого движения, движение потока становится почти полностью беспорядочным

Развитие вихрей в экспериментальной установке. Снимки сделаны в перпендикулярном (а) и параллельном (б) к оси вихря направлениях. Визуализация вихревого движения проведена впрыском разноцветных красителей: коричневого — у боковых стенок установки, желто-зеленого — ближе к центру, и красного — в центре. (Th. Leweke, T. Sawada, Springer, Berlin, 1992)

С понижением давления в центре первоначального вихря (справа) кварцевый песок поднимается вверх. Ядро начального вихря слегка наклонено и изогнуто. За начальным завихрением следуют два других, значительно более слабых, вихря. Они, по-видимому, разрушаются, т. к. частички песка рассыпаются и больше не собираются в центре



завихрения отчетливо видно и на снимках, сделанных в «фас» — в плоскости, параллельной оси завихрения. Эти фотографии имеют некоторое сходство со снимками ураганов, сделанными со спутников или космических станций. Во второй серии экспериментов контейнер повернули на 90°, так что ось пластины заняла вертикальное положение. Верхнюю стенку контейнера сняли, а на дно насыпали кварцевый песок. Затем стали изучать образование завихрения в слое жидкости над песчаным дном — песок в этом случае исполнял роль красителя, маркера вихревого движения.

Когда пластина поворачивалась, в воде возникало начальное завихрение, как и в предыдущем эксперименте. Затем также образовывались два других вихря, значительно слабее первого. Хотя кварцевый песок довольно тяжелый, в центре вихрей давление настолько понижалось, что песок засасывался и поднимался вверх. При относительно высоких скоростях вращения пластины ядро завихрения на некотором расстоянии от дна оставалось практически прямолинейным, а выше — закручивалось в спираль. В последующих экспериментах удалось показать, что при сильном завихрении ядро вихря может замкнуться в полный круг.

Подобные деформации ядра вихря наблюдались и в природных условиях — в случае торнадо. Так, А. Б. С. Уипл в своей книге «Ураган» привел серию снимков, демонстрирующих развитие торнадо 6 июля 1978 г. в Северной Дакоте (США). Воронкообразное ядро торнадо, видимое благодаря присутствию в нем водяного пара, имело практически форму круга, как и в описанном выше эксперименте.

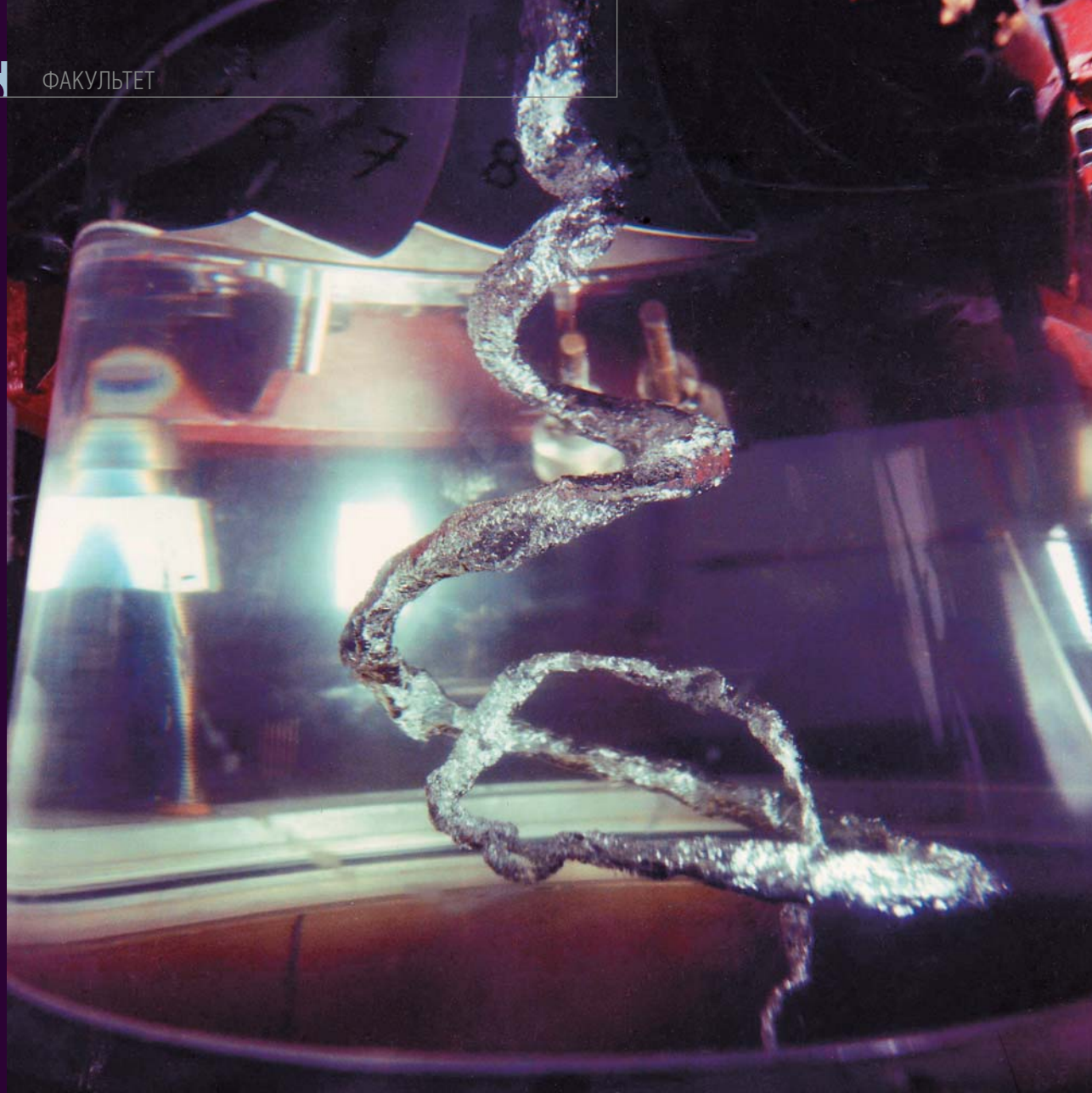


При высокой скорости вращения ядро первоначального вихря закручивается в спираль. Хотя изогнутая часть ядра расположена почти горизонтально, частички песка в нем не оседают



Ядро сильного завихрения может замыкаться в круг

Визуализация вихрей в экспериментальной установке с помощью песка (Th. Leweke, 1990)



Пузырек и спираль

Явление, при котором ядро вихря начинает отклоняться от прямой линии и закручиваться в спираль, называется *разрушением спиралевидного вихря*. Оно происходит и в потоках других типов, образующихся, например, в турбореактивных двигателях. Одним из примеров такого вихревого потока служит закрученный поток в модели диффузора гидротурбины, изученный швейцарскими учеными. Ядро завихрения, возникающего при прохождении диффузора, деформируется и приобретает форму спирали.

Еще один пример — закрученный поток в трубопроводе с переменным сечением, распад ядра которого вызывается ростом давления в трубопроводе в *аксиальном* (осевом) направлении. Нужно отметить, что предшественником разрушения спиралевидного вих-

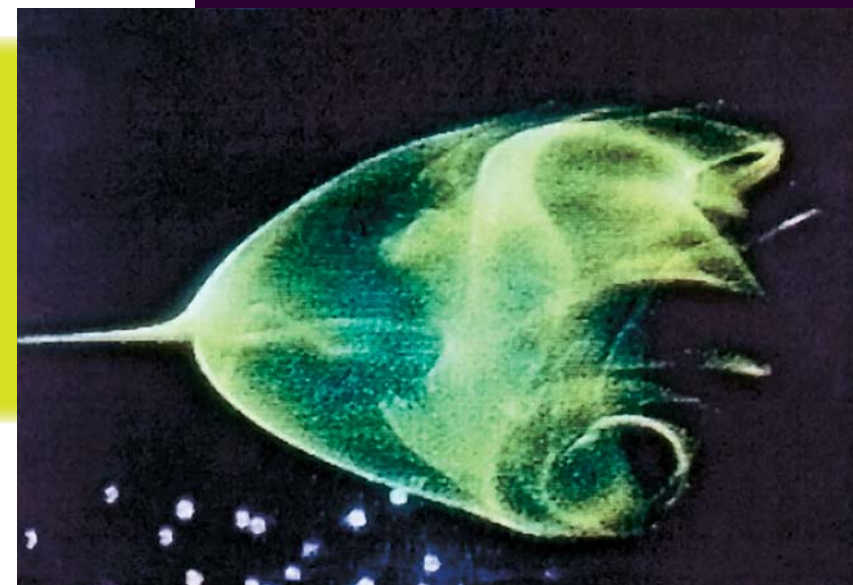
Ядро закрученного потока в модели диффузора гидротурбины — пример внутреннего вихревого потока. Поток входит в прозрачный диффузор в верхней части и выходит в нижней части. Ядро завихрения визуализируется пузырьками растворенного в воде воздуха. Ядро деформируется и приобретает форму спирали в результате изменения давления в потоке в аксиальном и радиальном направлениях — типичная картина разрушения спиралевидного вихря. Фотография предоставлена Институтом гидравлических машин и механики жидкости Федеральной Политехнической школы в Лозанне (Швейцария)

Закрученный поток в трубопроводе с переменным поперечным сечением. Поток в трубопроводе идет слева направо, его ось направлена горизонтально. Краситель, используемый для визуализации, впрыскивается выше по потоку через тонкую трубочку, установленную на оси трубопровода (M. Breuer, 1991)

ря часто является распад другого типа — *пузырьковый*. Именно такой «пузырек» и образуется в потоке жидкости в трубопроводе. Сначала появляется вихревая структура в форме парных колец, одно из которых расположено по ходу потока от пузырька («вниз по течению»), а другое — выше по потоку. Давление в трубопроводе растет до тех пор, пока в нем не сформируется *точка торможения*, ниже которой жидкость начинает двигаться в обратном направлении.

Перед началом разрушения пузырьрек становится почти симметричным относительно своей оси, но затем завихрение, расположенное ниже по потоку, отрывается и движется вниз «по течению». Симметрия утрачивается, вихревое кольцо, покидая зону высокого давления, расположенную ниже точки торможения потока, разрушается. Ядро завихрения закручивается в спираль вокруг зоны высокого давления — поток начинает разрушаться по спиралевидному типу. Интересно, что хотя такие потоки в трубах активно изучались в последние двадцать лет, условия, определяющие переход от пузырькового распада к спиральному, до сих пор остаются неизвестными.

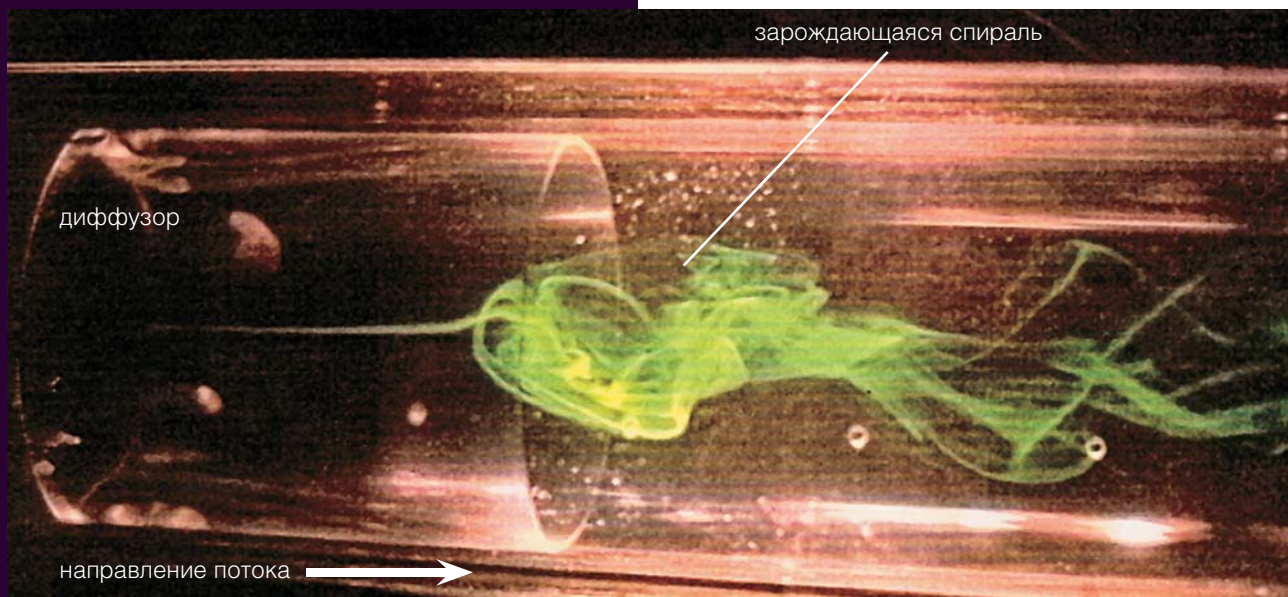
В 1978 г. американцы Дж. Х. Фэллер и С. Лейбович провели этот эксперимент таким образом, что и пузырь, и вихревое кольцо ста-



Пузырьковый тип разрушения вихря, предшествующий разрушению спиралевидного вихря. В начале процесса формируется вихревая структура в форме парных колец, из которых визуализируется только второе, расположенное по ходу потока от пузырька



После потери симметричности ядро вихря закручивается в спираль — поток начинает распадаться по спиральному типу



Переходная фаза в развитии вихревой структуры в трубопроводе с переменным сечением, полученная в эксперименте Фэлера-Лейбовича. Поток воды тормозится диффузором, сделанным из плексигласа и вставленным в трубу. Зеленый флуоресцентный краситель впрыскивается через трубку, ориентированную вдоль осевой линии трубопровода. Парная вихревая структура сразу после точки торможения (которая формируется поблизости от выхода из диффузора) «сбрасывает» второе кольцо, и спираль начинает зарождаться в следе пузыря (M. Breuer, 1991)



Численное моделирование эксперимента Фэлера-Лейбовича (M. Weimer, 1997)

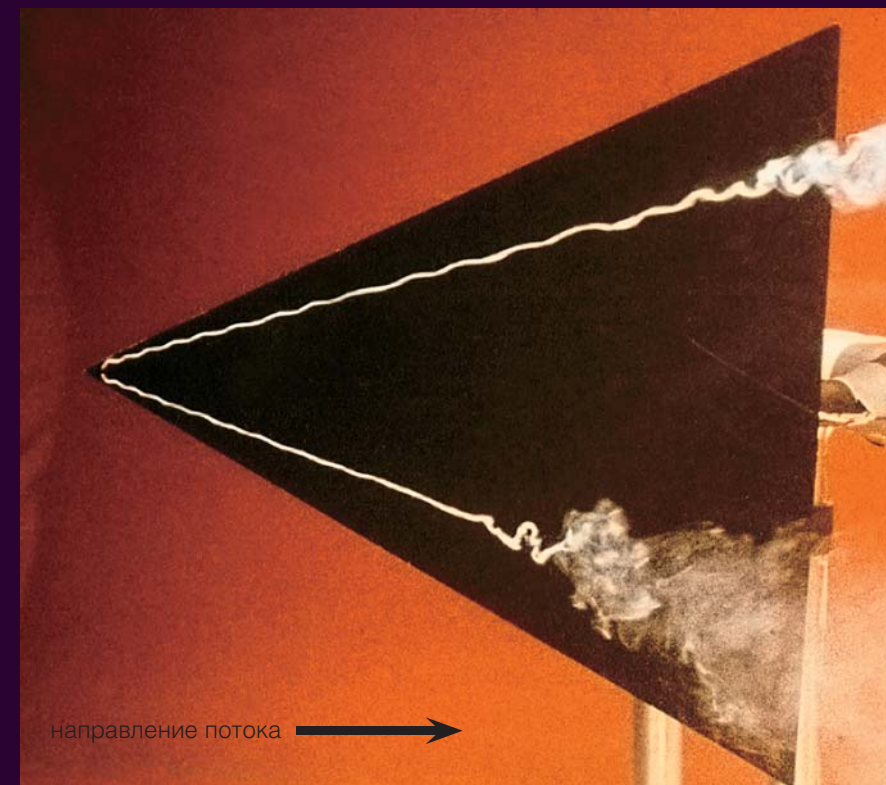
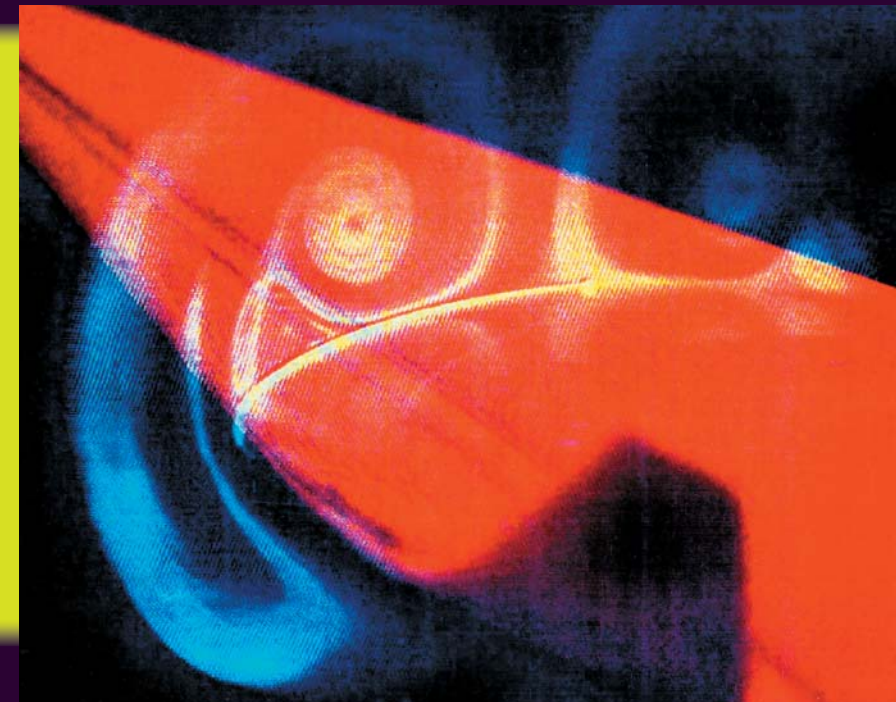
бильно оставались в потоке на одном и том же месте. И прошло почти двадцать лет, прежде чем такую парную конфигурацию вихревого распада удалось смоделировать с помощью мощного компьютера — получив численное решение уравнения Навье-Стокса, описывающего течение вязкой жидкости. Повторил эксперимент Фэлера-Лейбовича М. Ваймер из Аэродинамического института, который показал, что пузырь после образования точки торможения на оси завихрения потока сначала немного «мигрирует» вверх по течению, а потом держится на постоянном месте.

Самолеты и космолеты

Разрушение вихрей может происходить и на крыльях сверхзвуковых самолетов и транспортных космических кораблей, обычно имеющих треугольную форму. Такие крылья генерируют на подветренной стороне вихревые системы — благодаря этому их подъемная сила увеличивается при больших углах атаки (наклоне крыла к линии полета). Такая вихревая система состоит из большого первичного вихря, двух-трех более мелких вторичных вихрей, вихрей третьего (а иногда и четвертого) порядка, а также сдвигового слоя. Благодаря низкому давлению в ядре первичного вихря подъемная сила крыла увеличивается нелинейно.

При больших углах атаки давление в основном потоке на верхней стороне крыла растет по направлению к его задней кромке — это влияет на структуру вихревого движения. И в случае, если давление начинает быстро расти, первичный вихрь распадается.

Вихри на подветренной стороне крыла модели гиперзвукового самолета, находящейся под определенным углом атаки в аэродинамической трубе малых скоростей. Визуализация «лазерным ножом». Белым цветом окрашены большой первичный вихрь и другие вихри меньшего размера. Узкие темные области на поверхности показывают места отрыва и присоединения поперечного потока, вызванного вихрями (R. Staufenbiehl, 1996)



Вихри на подветренной стороне модели треугольного крыла, помещенной в гидродинамическую трубу под углом бокового скольжения. Ядра вихрей визуализируются впрыскиванием белого красителя через два маленьких отверстия в вершине крыла. Распространение и диффузия белого красителя в окружающую воду указывают на разрушение вихрей (A. Stromberg, W. Limberg, 1993).

В. Лимберг и А. Штромберг, исследователи из Аэродинамического института, на модели транспортной космической системы с использованием метода визуализации потока показали, что режимы распада вихрей, описанные для закрученных потоках в трубах, «работают» и на подветренной стороне подобных космолетов.

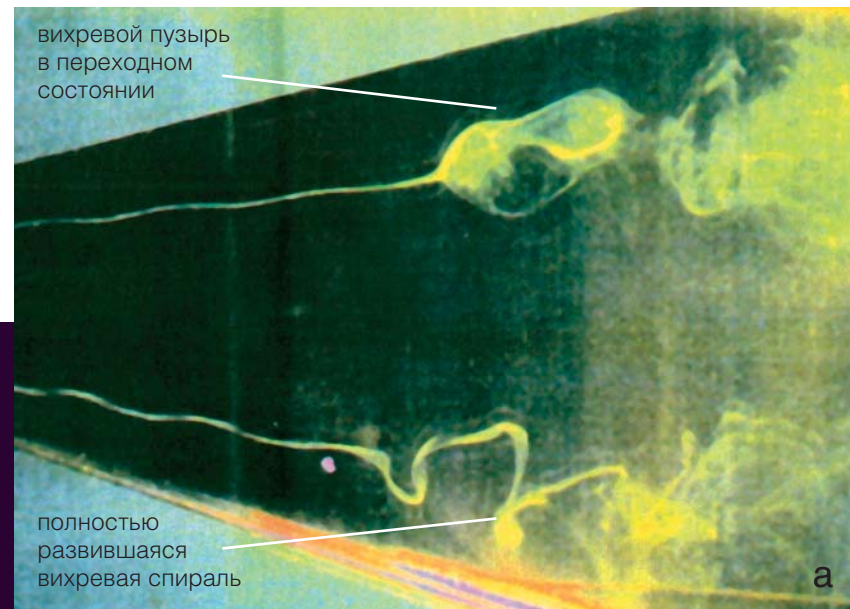
«Ветвистые» трубы

Первые работы по расчетам характеристик течения жидкости в трубах были опубликованы более 150 лет назад Г. Хагеном и Дж. Пуайзелем. Казалось бы, что с тех пор почти все, что происходит в этих потоках, включая образование вихревых структур, можно было

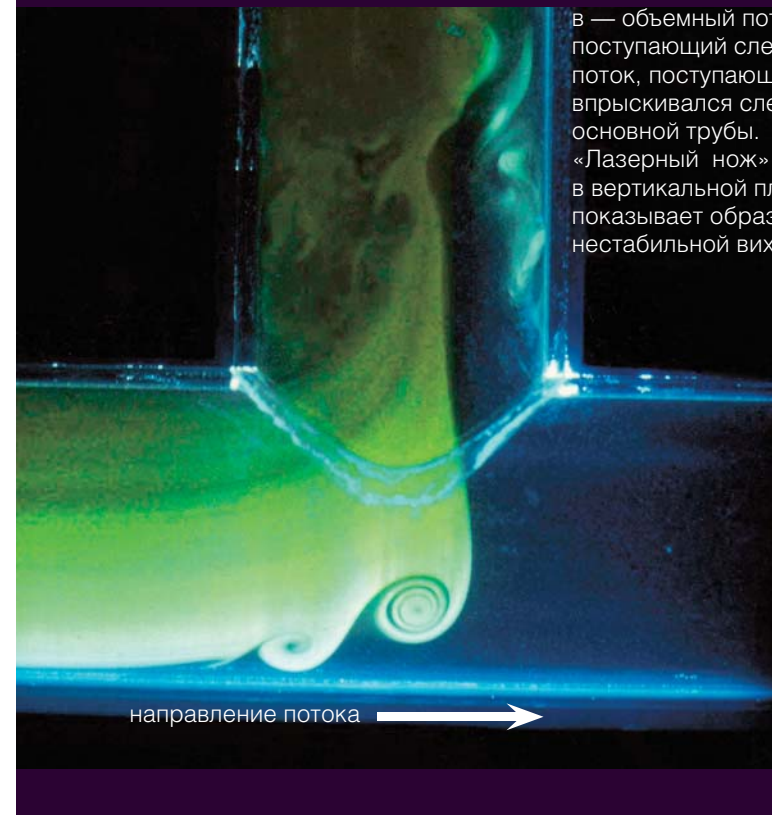
описать уравнениями, выведенными этими учеными. Однако ситуация радикально меняется, когда речь заходит об изогнутых или разветвленных трубах.

Хотя в первом случае задача усложняется лишь кривизной трубы, это значительно меняет всю картину. Описать же течение в разветвленных трубах еще сложнее — для них может существовать сразу несколько режимов потоков в зависимости от направления и интенсивности движения жидкости. Эта проблема была детально изучена в 1990 г. учеными из Аэродинамического института Р. Найкесом и Б. Бартманном, которые использовали трубы, соединенные под разным углом.

Ответвление в виде изогнутой трубы переменного сечения, например, генерирует вторичный поток, меняющийся от сечения к сечению. При взаимодействии его с основным потоком формируется несколько как бы «заплетенных в косички» линий тока жидкости. Это наводит на мысль, что завихрения в потоке образуются вследствие изгиба трубы, что подтверждается снимками окрашенного потока. Скручивание линий тока жидкости наблюдается также в слу-

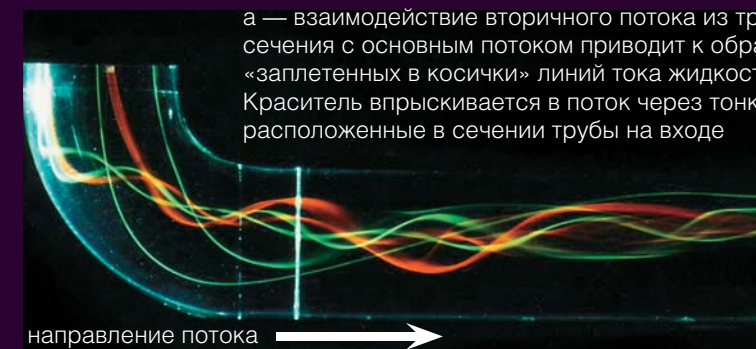
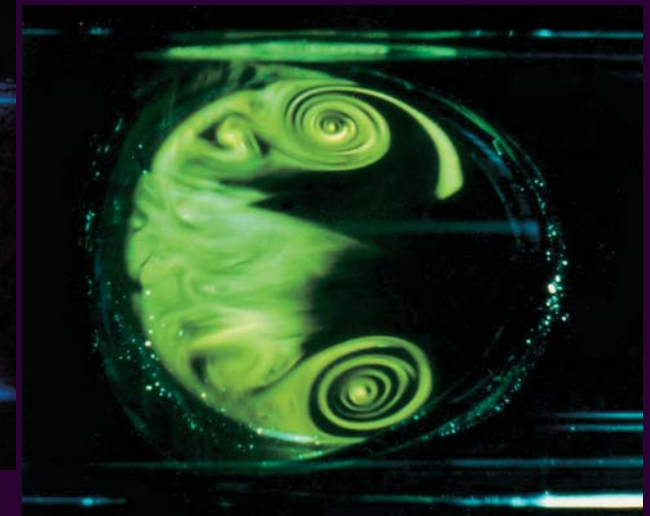


Распад вихрей на подветренной стороне модели транспортной космической системы (A. Stromberg, W. Limberg, 1993): а — вид сверху; б — вид сбоку



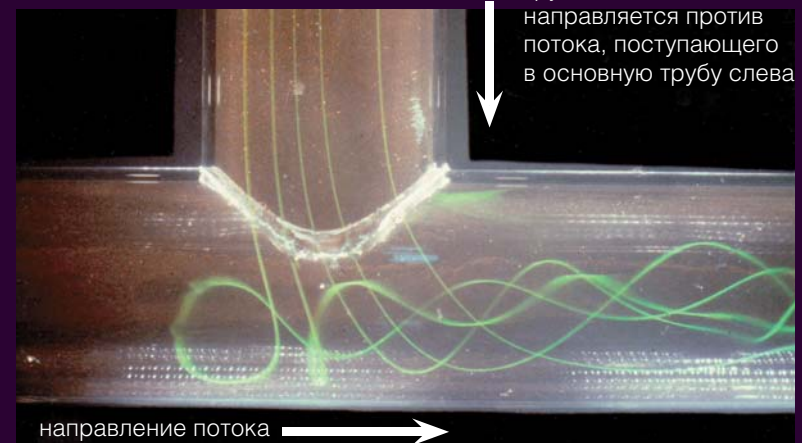
в — объемный поток в основной трубе, поступающий слева, вдвое превосходит поток, поступающий справа. Краситель впрыскивался слева во входное сечение основной трубы. «Лазерный нож», расположенный в вертикальной плоскости симметрии, показывает образование очень нестабильной вихревой структуры

б — «лазерный нож» в горизонтальной плоскости демонстрирует противоположно вращающиеся вихри, симметричные относительно вертикальной плоскости



а — взаимодействие вторичного потока из трубы переменного сечения с основным потоком приводит к образованию «заплетенных в косички» линий тока жидкости. Краситель впрыскивается в поток через тонкие трубочки, расположенные в сечении трубы на входе

г — объемный поток, поступающий сверху через ответвление, в восемь раз превосходит объемный поток в основной трубе. Часть его даже направляется против потока, поступающего в основную трубу слева



Образование вихрей в разветвленных трубах (R. Neikes, 1989): а — ответвление в виде изогнутой трубы; б — ответвление наклонено к основной трубе под углом 67.5°, сечение выхода справа перекрыто; в — поток поступает с обоих концов основной трубы; г — ответвление подсоединено под прямым углом



Типичные формы вихрей, образующихся в разветвленных трубах. Световые проекции сделаны в горизонтальной плоскости симметрии (R. Neikes, 1989)

Вихри в автомобильном двигателе

В последние годы исследования вихревых структур ведутся и в таком важном прикладном направлении, как усовершенствование автомобильных двигателей. Ученые пытаются увеличить эффективность сгорания автомобильного топлива за счет создания вихревых колец, благодаря которым топливо могло бы распределяться в цилиндре не так, как при обычном впрыске.

Первым потоки в поршневых цилиндрах исследовал в 1988 г. Х. Вайс из Аэродинамического института. Он создал испытательный стенд с прозрачным цилиндром, в который с помощью поршня засасывалась вода, а для наблюдения за потоком через щель открытого клапана впрыскивался флуоресцентный краситель. Результаты экспериментов показали, что на такте всасывания в цилиндре образовывались два вихревых кольца.

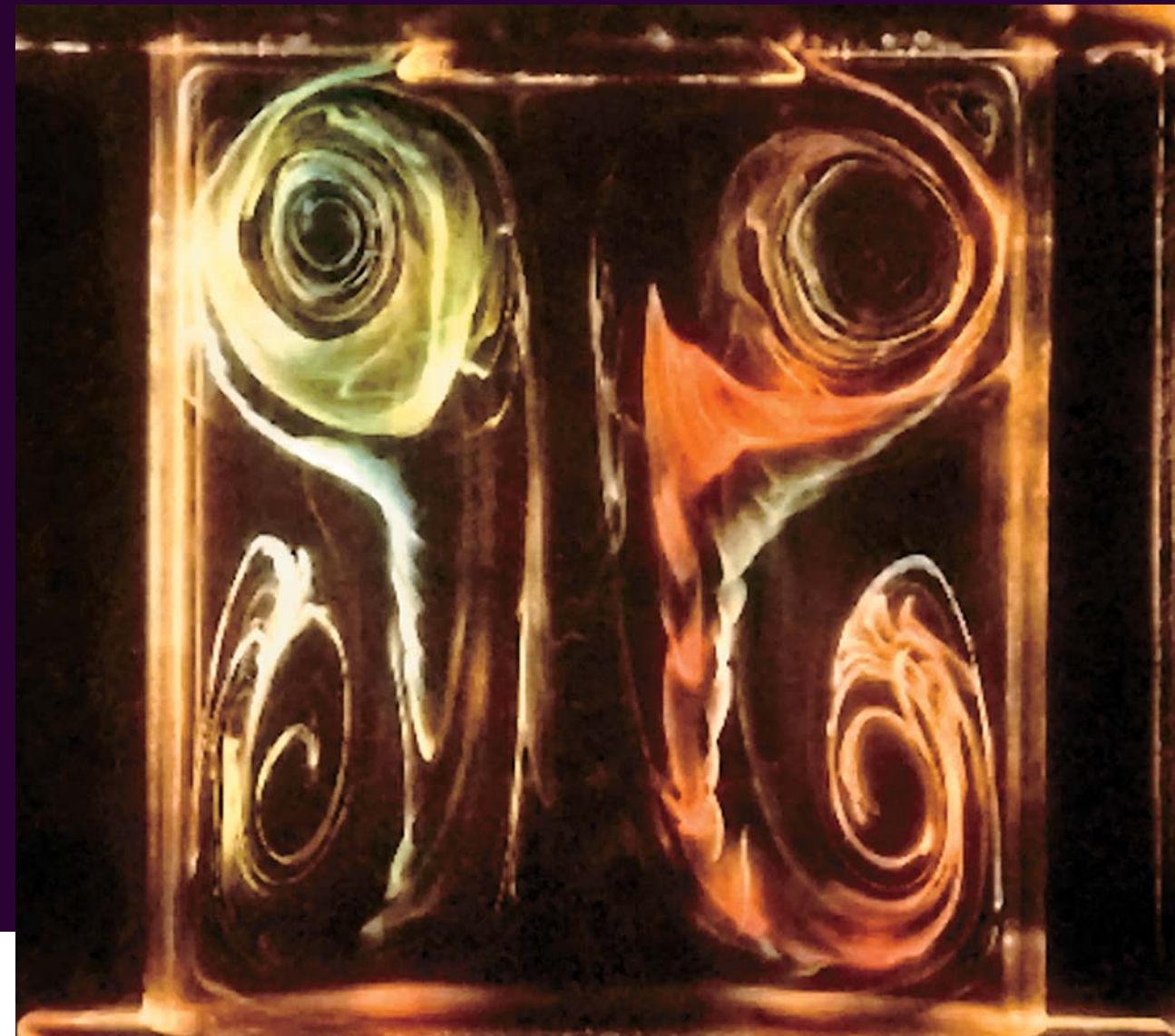
Позже этот эксперимент был смоделирован с помощью численных методов А. Абдельфаттахом, коллегой Вайса. Еще через несколько лет Абдельфаттаху с сотрудниками удалось решить проблему более эффективного распределения топливно-воздушной смеси в цилиндре, благодаря чему расход топлива в автомобиле можно было уменьшить. К 2003 г. эта разработка была доведена до стадии промышленного использования на заводе БМВ в Мюнхене.

В заключение хочется еще раз подчеркнуть, что с вихревыми структурами нам приходится сталкиваться в самых разных ситуациях. Конечно, сегодня о вихрях мы знаем далеко не все, и их исследования будут продолжаться многие годы. Тем не менее сведения, почерпнутые из этой статьи, могут помочь лучше понять эти красивые и не всегда предсказуемые физические явления. Как и любое уникальное творение природы, вихри способны будоражить наше воображение и побуждать нас к поискам ответов на все новые и новые вопросы.

Автор и редакция благодарят д. ф.-м. н. В. Н. Ветлущого (Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск) за помощь в подготовке публикации

чае, когда ответвление присоединено к основной трубе под прямым углом. Образование крайне нестабильной вихревой структуры наблюдается и тогда, когда поток поступает с обоих концов основной трубы.

Кольцевые и подковообразные вихревые структуры, периодически образующиеся в разветвленной трубе, движутся затем вместе с основным потоком. При этом частота образования завихрений во многом зависит от объемного расхода жидкости и числа Рейнольдса (соотношения характерных сил инерции и вязкости).



Два вихревых кольца, образующиеся на такте всасывания в цилиндре двигателя автомобиля. Результаты получены на испытательном стенде с прозрачным цилиндром, в который за счет движения поршня засасывалась вода. Флуоресцентный краситель впрыскивался через щель открытого клапана (H. Weiss, 1988)

Результаты численного моделирования течения в 4-клапанном двигателе автомобиля. (A. Abdelfattah, 1998).

Две вихревые петли, образовавшиеся на такте впуска в двигателе и визуализированные в момент нахождения в верхней мертвой точке, представляют собой решение уравнений Навье-Стокса в модели, разработанной А. Абдельфаттахом в 1998 г.

