

УДК 532.5

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

П. А. ПЕТРОВ

(Москва)

Экспериментально доказывается, что вихревое кольцо создается путем торможения центральной части потока и что в процессе формирования этого кольца можно изменять величину массы жидкости, участвующей в его образовании. Устанавливается также возможность получения жидкостных вихревых стужков в виде полусфер и сфероидов.

В литературе известны экспериментальные и теоретические работы, посвященные изучению поведения и взаимодействия одиночных колец [1-5]. Опыт показывает, что существующее представление о механизме формирования этих колец не соответствует действительности. Так, например, Прандтль, анализируя ранее опубликованные экспериментальные работы, принимает схему грибовидного вихря, которая не вскрывает процесса образования тороида [6]. Он ошибочно считает, что тороид возникает при взаимодействии поверхности потока с кромкой отверстия, а ножка гриба представляет собой цилиндрический вихрь по типу смерча.

Первое положение он подтверждает указанием, что «при выходе из отверстия образуется вихревое кольцо, увлекаемое струей жидкости».

Магарвей и Маклатчи экспериментально исследовали вопрос устойчивости колец [7]. Наконец, в одной из последних работ Максворси [8] в конце статьи пришел к модели, мало чем отличающейся от модели Прандтля.

До сих пор не уделялось должного внимания уточнению роли центральной части потока в образовании вихревого кольца, выяснению возможности создавать тороиды с различной массой и, наконец, разработке методов возбуждения стужков полусфероида и сфероидального вида.

Данная работа является попыткой восполнить этот пробел.

1. Опыты проводились на гидравлической модели. Условия проведения исследований мало чем отличались от условий, которые обеспечивались в работах других авторов с затопленной струей, создаваемой подкрашенной жидкостью. Плоская конструкция модели давала возможность производить фотосъемку объектов «на просвет».

Основное требование к экспериментам сводилось к исключению влияния вихревого поля, создаваемого соседними вихрями, на поведение выделенного изучаемого вихря. Это условие достигалось исследованием вихрей миниатюрных размеров. Фотоснимки вихрей увеличивались при копировании.

Опыт показал, что вихри возникают при любых формах форсунок. Струя жидкости может подаваться в любом направлении — как со среза сопла, так и из щели. Поведение вихрей не зависит от соотношения их размеров и модели.

Исследуемые вихри находились внутри объема жидкости и при соприкосновении их с ее поверхностью они разрушались.

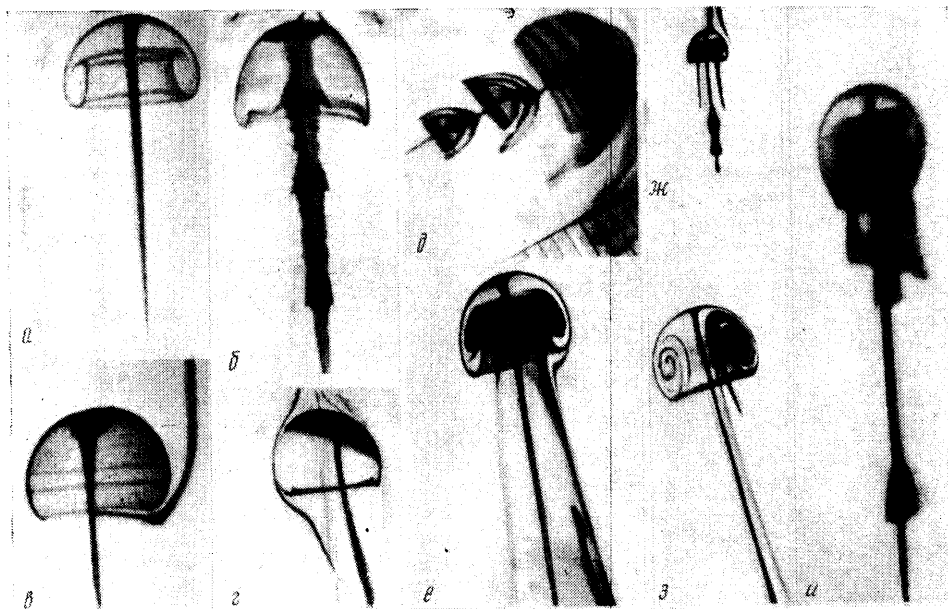
В данных исследованиях скорость циркуляции колец не доводилась до начала возникновения воздушной полости в ядре вихря. Вихри на всех снимках представлены в виде их сечения, которое находилось в фокусе объектива.

2. Затопленная струя подкрашенной жидкости, подаваемая с постоянной скоростью, при выходе из форсунки поступала в среду в виде гладкого канала, который сохраняется на расстоянии 50 диаметров отверстия. По мере удаления струя теряет свою устойчивость, вследствие чего возникает хаотическое вихревое течение жидкости.

Применение импульсной подачи жидкости приводит к образованию в лобовой части потока единичных сгустков.

Форма питающих каналов зависит от условия подачи жидкости. Так, например, гладкий канал возникает при единичном импульсе. Канал в виде елочки получается при пульсирующем потоке (см. фиг. 1, а, б). Очертание сгустков и каналов зависит от соотношения кинетической энергии потока и сопротивления среды.

3. На фиг. 1, а приведена отдельная стадия процесса формирования полусфероида вихря путем питания его одиночным импульсом, на фиг. 1, в — многократными импульсами, фиг. 1, б — пульсирующим пото-



Фиг. 1

ком. В последних случаях на стенках сфер наблюдаются горизонтально расположенные слои, число которых соответствует количеству поданных импульсов.

Грибовидный вихрь (фиг. 1, а) частично раскрывает механизм формирования тороида в нижней части шапки, а именно: жидкость для его спиралевидной закрутки поступает через заторможенную лобовую-центральную часть потока, т. е. через лобовую стенку грибовидного вихря. Этот процесс формирования тороида, как показал опыт, начинается при торможении центральной части потока; внутренняя же структура продолжает формироваться и при полном его торможении.

Торможение вихря в основном обуславливается увеличением диаметра головки потока вследствие появления поперечного течения жидкости, которое приводит к увеличению лобового сопротивления.

Эксперимент показывает, что жидкость может поступать к тороиду пока существует утолщенная стенка в верхней части шапки вихря. Это обстоятельство хорошо подтверждается фиг. 1, г, на которой показан случай, когда питающий канал смещается от центра формируемой полусферы. Несмотря на это смещение, внешний ее вид не искажается.

4. Масса жидкости, образующая тороид, может быть увеличена путем введения в полость шапки грибовидного вихря дополнительных импуль-

сов также в виде полусфер, но меньшего диаметра и перемещающихся с большей скоростью (см. фиг. 1, *д*). В этом случае все вихревые полусферы могут быть введены в верхнюю основную полость путем подачи более энергичного дополнительного импульса любой формы, что будет способствовать утолщению лобовой стенки грибовидного вихря, а следовательно, и формируемого тороида. Образование такого сложного по своей структуре вихря в значительной степени зависит от количества, формы и скорости передвижения дополнительных полусфер.

5. Дальнейшее усиление закрутки формируемого тороида может быть осуществлено путем подачи жидкости непосредственно к тороиду. В этом случае жидкость должна подаваться к нему с помощью дополнительного потока в виде ножки гриба трубчатого сечения (см. фиг. 1, *е*). Такого вида ножка получается при разрушении полусфероидального вихря подачей сгустка любой формы, в частности конуса (см. фиг. 1, *ж*), но с большей энергией, чем разрушаемая полусфера. Разрушение полусферы осуществляется до ввода ее в полость формируемой сферы в качестве дополнительного импульса. При этом разрушении остается след, который приобретает вид ножки грибовидного вихря. Диаметр ножки соответствует диаметру разрушенной полусферы.

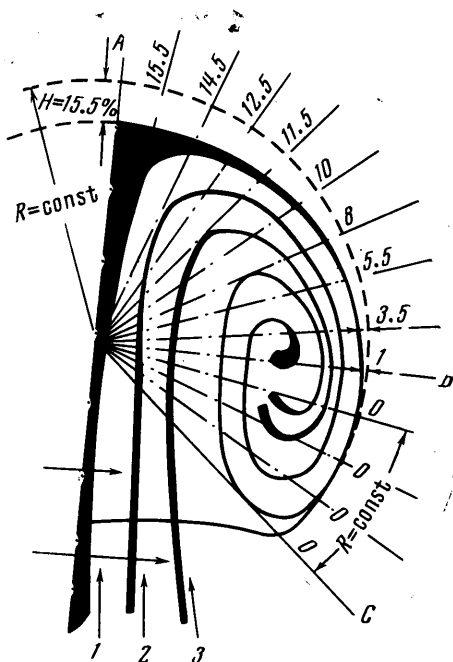
В процессе образования тороида цилиндрическая ножка входит в сферу значительно быстрее, чем движется сильно заторможенная сфера, и она

свою массу передает непосредственно формируемому тороиду. Ускорению движения ножки частично способствуют возникающие здесь втягивающие силы и поток жидкости по центральному каналу.

Опыт показывает, что вспомогательные полусферы входят в основную полость вихря со срезанными головками, которые исчезают при их взаимодействии с завихрением и с центральным питающим каналом.

Введение в полость основного грибовидного вихря нескольких сфероидальных вихрей, образованных с помощью ножек трубчатого вида, приводит к получению сложного многослойного тороида (см. фиг. 1, *з*). В этом случае ножки располагаются концентрически друг относительно друга. При формировании данного тороида было затрачено семь импульсов.

6. Скорость движения вихря зависит от соотношения его кинетической энергии движения и сопротивления среды. Возникающие при этом в среде силы сопротивления подобны силам обжатия движущегося полуголоподкрутого твердого тела, в качестве которого здесь служит лобовая часть полусферы. Следовательно, по изменению формы его сечения можно судить о характере этого обжатия. На фиг. 2 в увеличенном масштабе дано сечение многослойного тороида, приведенного на фиг. 1, *з*. В верх-



Фиг. 2

ней части схемы указано изменение сил обжатия (в процентах), приводящих к усадке формы лобовой части потока. За начальный момент отсчета этой усадки была принята сфера с постоянным радиусом (R), показанная пунктиром.

Определение расчетом степени усадки от угла сечения вихря можно отнести к задаче оценки давления на внутреннюю поверхность двух трубопроводов, изогнутых по кругу и полученных в результате деления основного канала на две равных по сечению трубы. Решение этой задачи может быть выполнено на основе теоремы Эйлера о равенстве векторов сил, действующих на поверхность разветвленных трубопроводов с проекцией главного вектора основного потока [9]. В результате получим

$$P = \alpha \rho S v^2 (1 + \cos \varphi)$$

Здесь v и ρ — скорость и плотность потока, S — сечение канала и α — коэффициент, учитывающий влияние веса и трение жидкости.

7. Определение критерия Рейнольдса в данном случае было затруднено, так как в опытах использовались малые количества жидкости, выбрасываемой из форсунки. Кроме того, энергия импульсной струи изменялась во время наблюдения, что требовалось необходимостью поддерживать внешнюю форму исследуемого вихря. Наконец, как показал опыт, диаметр питающего канала изменялся по своей длине. Особенно резкое его увеличение за счет торможения наблюдалось непосредственно у лобовой части сферы, что видно на фиг. 1, *a* и *в*. Примерная оценка числа Рейнольдса приведена ниже:

l	m	v	Re
40	—0.18—0.32	87—165	12—24
80	0.07—0.18	9.3—35	5—13

Здесь l — расстояние от форсунки (в диаметрах ее сечения); m — масса жидкости, выбрасываемая в среду, $mm^3/сек$; v — скорость струи, $см/сек$; Re — число Рейнольдса.

Вычисления критерия производились с учетом диаметра форсунки при стационарном движении жидкости и при скоростях, характерных для начала вихревого течения в условиях опыта. Масса цилиндрических ножек не учитывалась.

Результаты измерений показывают, что опыты проводились в области течения спутанных струй, в которой обеспечиваются наилучшие условия для их моделирования.

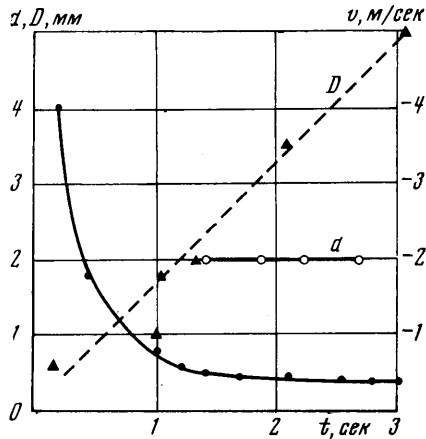
Объем подкрашенной жидкости, выбрасываемой за время одного импульса, при формировании одиночных грибовидных вихрей (см. фиг. 1, *a*) колебался в пределах 8—12 mm^3 , а при образовании сложных тороидов он достигал 30 mm^3 и более. Следует заметить, что при формировании первого основного вихря требовалось значительно большее количество жидкости, чем при поддержании дальнейшего его существования. В последнем случае объем жидкости в отдельных импульсах колебался в пределах нескольких mm^3 .

Нетрудно видеть, что скорости течения жидкости в рассматриваемых опытах далеко не обеспечивали условий получения критического значения начала кавитационного разрыва жидкости $\chi = 2(p - p_0)(\rho v^2)^{-1}$, но все же пониженное давление имелось. Последнее обстоятельство способствовало образованию возвратного потока и возникновению спиралевидного завихрения. Все это в сумме давало возможность создавать сгустки, по своей форме приближающиеся к сфероиду. На фиг. 1, *и* приведен сни-

мок почти полностью оформленной сферы. Оставшаяся здесь часть цилиндрической ножки обычно входит во внутреннюю полость сферы, в результате чего образуется полностью законченный сфероид. На данном снимке окружность сохраняется в пределах 290° .

8. Исследование образования вихрей с помощью скоростной камеры показало, что процесс формирования грибовидного вихря и тороида может быть представлен в виде графиков.

На фиг. 3 приведена зависимость изменения скорости движения грибовидного вихря от времени его формирования. За это время вихрь получил пять разных по величине отдельных импульсов, в результате чего наблюдается некоторый разброс экспериментальных данных. Последнее измерение на данной кривой фиксирует момент образования внешне законченной полусферы. К этому моменту скорость (v) продвижения вихря снизилась почти в десять раз, хотя формирование тороида внутри полости вихря еще продолжалось.



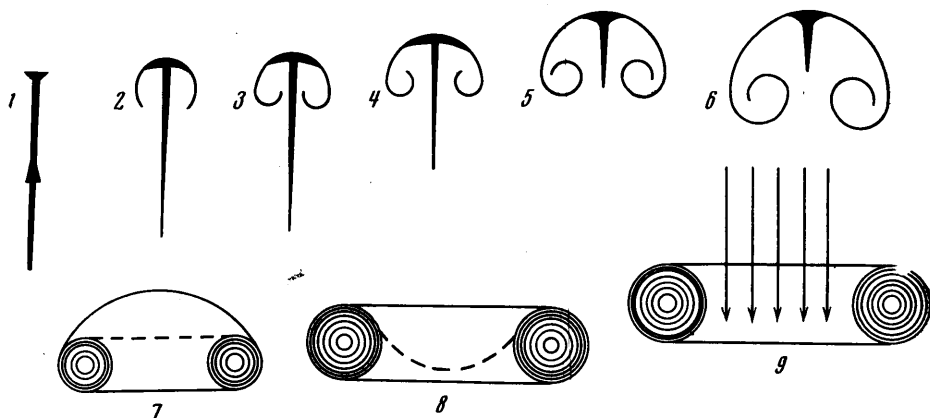
Фиг. 3

На этом графике приводятся также зависимости изменения диаметра сечения и диаметра тороида от времени его формирования (d и $D = f(t)$). График показывает, что диаметр тороида с течением времени его образования продолжает расти примерно по линейному закону. В то же время диаметр сечения тороида с момента сильного торможения вихря остается почти постоянным. Это показывает, что энергия потока с этого момента передается в основном на циркуляцию тороида. На этом основании можно заключить, что скорость движения кольца изменяется примерно обратно пропорционально времени, а следовательно, диаметру тороида ($v = kt^{-1} = k_1 D^{-1}$).

9. Процесс формирования тороида может быть представлен в виде отдельных этапов (см. фиг. 4). На первом этапе вследствие возникновения торможения питающего канала лобовая его часть расширяется, и появляется поперечный выброс жидкости в виде ответвления. Эти ответвления являются началом развития горизонтально направленного течения жидкости, которое усиливает торможение основного потока жидкости, а вместе с этим и появление завихрения на концах ответвления.

Одновременно с этим при приближении равновесия между давлением головки потока и давлением среды (динамического $\frac{1}{2}\rho v^2$ и статического) его торможение усиливается, в результате чего возникает горизонтально направленное течение жидкости вокруг головки этого потока. Наличие двух видов потоков (продольного и поперечного) приводит к формированию лобовой части сферы грибовидного вихря (см. этапы 2—4). Движение полусферы приводит к возникновению пониженного давления в ее полости, которое способствует созданию обратного движения жидкости и образованию завихрения подобного завихрению, возникающему при обтекании полого полукруглого твердого тела (этапы 4—6). Это завихрение жидкости кладет начало образованию циркуляции у формируемого тороида. Перемещение жидкости внутри вихря способствует постепенному исчезновению питающего канала и уменьшению толщины лобовой стенки шапки грибовидного вихря (этап 7).

Восьмой этап фиксирует тот момент, когда движение основного потока в центре кольцевого вихря настолько ватормаживается, что в дальнейшем его движении начинает принимать участие и его циркуляция. Все это влечет за собой сначала продавливание лобовой стенки вихря, а затем и ее разрушение. Наконец, на последнем этапе зафиксирован тот



Фиг. 4

момент, когда поток, вызванный циркуляцией вполне оформленного тороида, становится основным, и от него зависит время существования и направление движения тороида.

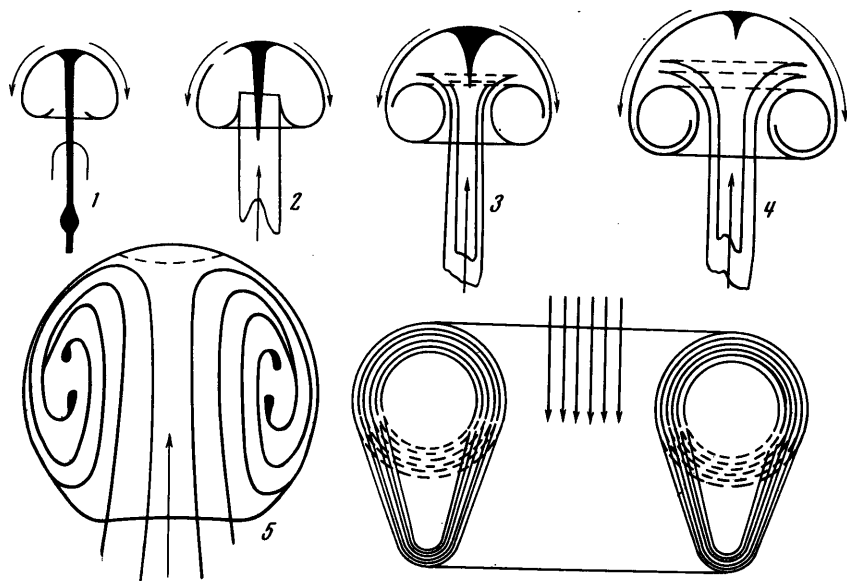
Таким образом, на первых этапах поведение тороида можно рассматривать как протекающее под принудительным на него воздействием потока. В этот период его формирования происходит накопление в нем энергии. На последнем же этапе тороид получает полную свободу и его дальнейшее поведение уже определяется количеством и характером запасенной им энергии в виде циркуляции.

10. Последовательность образования сложных многослойных тороидов может быть представлена в виде схемы (см. фиг. 5). Здесь первая стадия отражает момент, когда с помощью центрального канала сформировался грибовидный вихрь, и к нему подается дополнительный импульс в виде полусферы и следующий за ним более энергичный импульс в виде конуса (см. фиг. 1, ж). Этот конусообразный импульс как перемещающийся с большей скоростью встречает на своем пути полусферу и разрушает ее, в результате чего образуется цилиндрическая трубка, которая может рассматриваться как дополнительный питающий канал. Диаметр его равен диаметру разрушенной полусферы (см. второй этап).

Третий этап подобно первому фиксирует момент образования второго дополнительного канала, расположенного внутри предыдущего. На четвертом этапе эти трубчатые каналы входят во внутреннюю полость основной сферы и при своем движении, не достигая лобовой стенки вихря, непосредственно усиливают завихрение тороида путем взаимодействия с ним. Напомним, что поддержание лобовой части сферы продолжает осуществляться под влиянием потока, поданного по центральному каналу.

На пятом этапе при прекращении подачи жидкости заканчивается формирование многослойного тороида и начинает прогибаться лобовая стенка (см. пунктир). На шестом этапе тороид изображен с двойным сечением. Пунктиром показано сечение полностью законченного тороида.

Сплошной линией дано грушевидное сечение этого тороида в момент начала его разрушения под воздействием гравитационных сил, обусловленных более плотной подкрашенной жидкостью по сравнению со средой. Поэтому накопленная масса в тороиде при затухании циркуляции начинает осаждаться. На практике это осаждение протекает неравномерно



Фиг. 5

по всему тороиду. Следует полагать, что при равных плотностях подкрашенной жидкости и среды рассеяние тороида будет протекать равномерно во все стороны подобно дымовым кольцам в атмосфере.

В заключение следует отметить, что процесс образования спиралей у исследованных тороидов протекает при значительно больших скоростях, чем скорости, при которых возникают тороиды при движении каплей. В последнем случае эти спирали обуславливаются в основном гравитационными силами, действующими на каплю, и сопротивлением среды. В силу этого формирование тороида в этом случае происходит путем постепенного нарастания слоев спирали под влиянием сил трения, которые возникают при взаимодействии капли со средой. В результате такого медленно протекающего процесса число витков спирали может быть значительным [8].

В экспериментах показано, что спираль создается при торможении потока и возникновении у него поперечного движения жидкости, следовательно, скорость формирования спирали, как было указано, определяется соотношением кинетических энергий этих потоков. В то же время гравитационные силы будут или ускорять, или ослаблять это движение, так как они будут зависеть от направления движения основного потока.

Вследствие того что скорость нарастания спирали в данном случае может достигать значительных величин, число витков в свою очередь может соответственно снизиться. Это снижение будет характеризоваться расширением и даже образованием шапки грибовидного вихря на головке самой спирали, что было показано на фиг. 2.

Исследованные в данной работе вихри в принципе напоминают грибовидные вихри газовых и твердых сыпучих веществ, которые наблюдаются при различного рода взрывах. В последнем случае эта картина значительно усложняется вследствие паличия у взрыва большого количества отдельно хаотично расположенных очагов взрывающихся масс.

В заключение автор благодарит Г. А. Любимова и А. Т. Онуфриева за полезное обсуждение материала исследований и О. М. Белоцерковско-го за интерес к работе

Поступила 28 XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Helmholtz H. Zwei hydrodinamische Abhandlungen. für die reine und angew. Math., 1858, Bd 55.
 2. Кирхгоф Г. Механика. Лекции по математической физике. М., Изд-во АН СССР, 1962.
 3. Пуанкаре А. О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. М., Изд-во иностр. лит., 1947.
 4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидродинамика. М., Гостехиздат, 1948.
 5. Ламб Г. Гидродинамика. М., ОГИЗ, 1947.
 6. Prandtl L. Handbuch der Experimentalphysik, Bd 4, t. 1. Hydro- und Aerodinamik, 1931, S. 141. Experimentelles zur Wirbelbewegung. Erzeugung von Wirbelringen. Leipzig, 1931.
 7. Magarvey R., Maclatchy C. The Formation and structure of vortex ring and the disintegration of vortex rings. Canadian J. Phys., 1964, vol. 42, Nova Scotia.
 8. Maxworthy T. The structure and stability of vortex ring. J. Fluid Mech., 1972, vol. 51, pp. 15—32.
 9. Френкель Н. З. Гидродинамика. М., Госэнергоиздат, 1947.
-