

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЯ В ТРУБЕ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*Изложены результаты экспериментальных исследований по вихреобразованию в трубе. Показано, что первоначально дискретная пузырьковая масса, полученная в результате кавитации, превращается в сплошной вихрь, распространяющийся от доньшка трубы к верхней части. Образовавшийся трехмерный вихрь имеет строго структурированную форму и всегда состоит из трех непреременных элементов: ножки, тела и воронки. Вихрь представляет собой устойчивую, практически неизменяющуюся во времени субстанцию.*

*The results of experimental studies on vortex formation in a pipe are presented. It is shown that the initially discrete bubble mass obtained as a result of cavitation turns into a continuous vortex propagating from the bottom of the tube to the top. The resulting three-dimensional vortex has a strictly structured form and always consists of three indispensable elements: the legs, the body and the funnel. The vortex is a stable, practically unchanged substance in time.*

Ключевые слова: турбулентность, вихрь, труба, эффект.

Keywords: turbulence, vortex, trumpet, effect.

Труба является самой популярной в гидрогазодинамике конструкцией. И это не случайно, так как она является наиболее простым каналом и определяет внутреннее течение в критических условиях. Критических потому, что поток при этом не испытывает изменяющегося градиента давления. Он является постоянной величиной. Часто при разработке расчетных методов этот факт используют, чтобы затем с его помощью и с помощью экспериментальных поправок решить поставленную задачу.

В трубе было получено много великолепных эффектов, которые всегда давали опорную точку отсчета, являясь эталоном для сопоставления процессов между собой в чистых "незамутненных" условиях.

Всегда вновь открытые эффекты в трубах приводили к грандиозному всплеску научной активности и являлись источником вдохновения естествоиспытателей. Часто эти открытия позволяли разрешить сложнейшие, порой противоречивые представления о процессах, приводили их к логическому осознанию и давали им вразумительные объяснения. Так, например, опыты О. Рейнольдса на трубе разрешили спор между Даламбером в союзе с Эйлером и пароходостроителем Робертом Фултоном [1]. При этом была открыта турбулентность. Опыты Д.И. Тейлора тоже на трубе вдохновили целую плеяду великолепных ученых, занимавшихся вихревыми течениями, на новые исследования. Открытый им эффект имел гносеологическое значение. Он лег в основу прочного, монолитного фундамента знаний всей гидро- и газодинамики и особенно феноменологической теории турбулентности. Большую практическую значимость для ракетной техники имело изобретение Ивана Федоровича Шебеко газодинамической трубы, трубы Шебеко, которое решило проблему высотных испытаний ПВРД. Изобретение было основано на эжекционном трубном эффекте. Абсолютно ошеломляющий эффект произвели опыты Рийке на гудящей трубе. Им была открыта тепловая генерация акустических колебаний. Этот эффект лег в основу понимания процессов возникновения высокочастотной неустойчивости в ЖРД. Современники сразу по достоинству оценили открытие эффекта тепловой сепарации в вихревой трубе Ранка. Труба Ранка-Хилша на сегодняшний день является самым дешевым способом добычи холода.

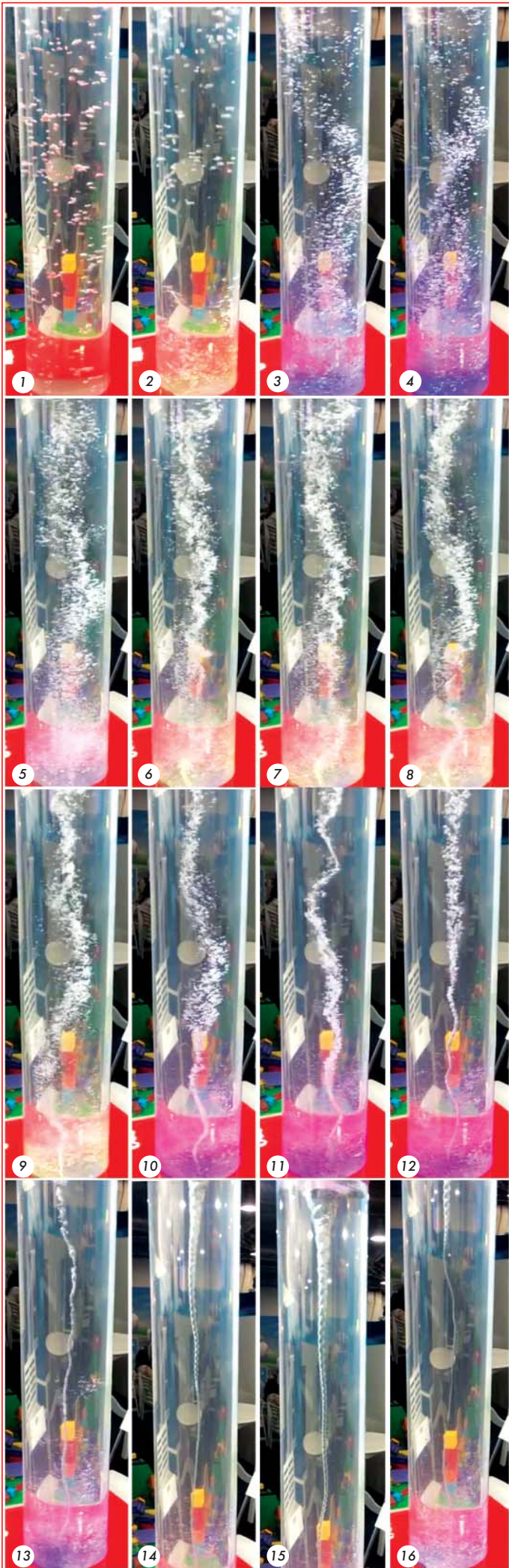
Люди, открывшие эти эффекты, были первыми. За ними шли последователи, которые совершенствовались, воплощали в жизнь конструкции, основанные на этих эффектах, расширяли диапазоны параметров их применения. Но начало было всегда за эффектами, первыми результатами, неизвестными до их открытия.

Одним из важных фактов, установленных при открытии эффектов был факт присутствия почти во всех эффектах, а если подробнее разбираться, то во всех эффектах - это факт присутствия турбулентности, то есть факт присутствия вихревых течений. И пространственная газовая динамика, и акустика, и тепловые процессы всегда сопровождалась и сопровождаются вихревыми, циклическими

течениями. Поэтому понятие вихрь в этих процессах занимает ключевое положение. Требуется разобраться с этим понятием - вихрь, хотя на неискушенный взгляд, кажется, уже все давно понятно.

### Понятие - "ВИХРЬ"

Внешне вихрь представляет собой вращающийся поток и самая привычная его конфигурация - это тороидальное газодинамическое образование, имеющее угловую скорость перемещения частиц. Но вихревыми могут быть и локальные участки, например, течения на изгибах линий тока, на поворотах и пр. Получается так, что вихри могут быть и не замкнутые, например, спиралеобразные. Поэтому вихрь принято рассматривать в точке поля. Вихрь - это полевая функция точки и математически она выражается через полевой оператор, ротор: ротор от вектора скорости есть вихрь. Каждый вихрь можно представить как удвоенную угловую скорость. Другими словами, получив в каждой точке газовое поле скоростей, то есть зависимость скорости от координат и времени, можно аналогично получить газовое поле угловых скоростей. Вроде бы и все. Все логично, но как резонно заявляет профессор Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Ю.Д. Чашечкин - это не так: "Идентифицируемость элемента жидкости позволяет проследить за траекторией движения его центра". В своих работах Юлий Дмитриевич предлагает в качестве основного параметра поля использовать импульс, формальное произведение плотности потока на скорость. Такого же мнения придерживается и Владимир Андреевич Князев: "Использование модели сплошной среды предполагает, что переменными теории могут быть только полевые переменные, то есть функции точки непрерывного пространства. Такой переменной, например, является динамический тензор, поток которого на некоторую замкнутую поверхность сплошной среды равен импульсу тела, ограниченного этой поверхностью." [3]. Другими словами, и в том и в другом случае проводится мысль о том, что уравнения движения должны записываться в зависимости от импульса. И этот факт понятен. Ведь импульс, характеризуя удельный расход, тем самым характеризует среднemasсовую скорость потока, которую можно реально определить из эксперимента. Таким образом, актуально рассматривать при изучении движения поля импульсов, а значит векторные операторы должны быть взяты от импульса. В связи с этим, приходим к новому качественному выводу о том, что вихрь должен вычисляться как ротор от импульса [4]. Что это означает и какую нагрузку несет на себе этот символ? Становится ясным, что если мы берем ротор от вектора скорости, то получается чисто математическая символика. Если же мы делаем то же самое с импульсом, то мы придаем этому символу материальность. Символ становится материальным объектом, например, смерчем, торнадо, сливным водопроводным вихрем и т.д. Новый вихрь приобретает форму, границы и даже имеет массу. Представим себе спокойную воду водоема, имеющего определенную мас-



су. Здесь вода мирно покоится, не изменяя своей формы. Но вдруг, по каким-то причинам, давление окружающей среды резко изменяется, появляется профиль (градиент) и вода в водоеме приобретает форму смерча. Масса смерча осталась такой же, как и была масса воды в водоеме. Форма этого смерча при постоянном профиле давления также меняться не будет. Вот в чем материальность вихря. И тогда появляется новый параметр турбулентности - произведение плотности на вектор угловой скорости. Это - угловой импульс. Его размерность - килограмм массы, деленный на метр кубический и секунду. В работе [4] этот вектор был назван материальной угловой скоростью и было показано, что для воронкообразного вихря  $rotj = 3\rho\omega$ .

Для обычного тороидального вихря  $rotj = 2\rho\omega$ , а для простого сдвигового течения у стенки  $rotj = \rho\omega$ .

В частном случае, для тороидального вихря с постоянной плотностью рабочего тела получаем классическое соотношение для ротора скорости:  $rotv = 2\omega$ .

### Когда возникают вихри

Наличие вихрей в потоке однозначно определяет поток как турбулентный. И наоборот, поток является турбулентным только тогда, когда он вихревой, то есть он (поток) должен математически описываться векторным оператором ротор. Так когда же возникает вихрь? Очевидно, что он возникает в трех случаях, именно тех случаях, когда на пути потока возникает препятствие. Оно может быть в виде:

1. Физической преграды, и тогда поток получает обратное движение, движение в противоположную сторону.

2. В виде силы вязкого трения, которая всегда направлена в сторону против потока.

3. В виде положительного градиента давления  $gradP > 0$ . Последнее выражение равносильно замедлению потока.

Положительный градиент давления может возникнуть по разным причинам. Это может произойти чисто по газодинамическим причинам, по причинам воздействия внешних сил (электромагнитных, гравитационных, центробежных и пр., а также в результате организации специальных мероприятий).

Особой причиной возникновения вихрей является попадание числа Маха в область трансзвукового течения, то есть в область, находящуюся между единицей и двойкой. Это утверждение впервые было озвучено в работе [5] и подлежит тщательному анализу в целях объяснения причин возникновения турбулентности в этой области. По-существу, прослеживается сильная зависимость от числа Маха и практически отсутствует зависимость от показателя адиабаты, что говорит о том, что процесс не зависит от природы рабочего тела.

Вихри также можно получить, специально организовав вращательное движение. Например, течение в турбине, или течение при сливе воды в ванной, или вращение потока за вентилятором. Все это есть приемы, которые предусматривают организацию вынужденных тангенциальных потоков. Вихревая картина в этих случаях получается, как правило, трехмерной и имеет вид, похожий на смерч. Но, как показывают опыты - это более сложная конфигурация, чем просто гладкая воронка. Это - тонкоорганизованное, высокодифференцированное образование, имеющее сложную ограничивающую поверхность со следами локальных вращательных и торсионных движений.

### Опыты на трубе

В торгово-развлекательном центре "Метрополис" в Москве рядом со станцией МЦК "Балтийская", а именно, в секции MOTOR CITY GRAND, где резвятся внуки счастливых бабушек и дедушек, есть один очень увлекательный аттракцион. Это - гидравлическая установка, на которой демонстрируется искусственно создаваемый вихрь, имеющий очень замысловатые формы. Наблюдаемая картина просто завораживает. Любой посетитель с помощью этой установки может "запнест" такую экзотическую косичку, которая даже не снилась Аленушке из сказки "Три медведя".



Автор перед началом эксперимента

Установка предельно проста. Стекло́нная труба диаметром 200 мм и высотой 1 м заполнена водой. Снизу у трубы доньшко, которое приводится во вращение с помощью передаточного устройства. Само вращение осуществляется с помощью штурвала, приводящегося в движение вручную. Нижние слои жидкости, "прилипшие" к днищу, также начинают вращаться, вовлекая при этом в движение последующие слои, и, тем самым, закручивая весь объём. Со временем выстраивается стройная динамика зарождения вихревого течения.

Но это по существу - детское развлечение. При серьёзном научном подходе открываются хорошие возможности изучить нюансы сложнейшего процесса формирования вихря, а значит - турбулентности. И в то время, пока внук с бабушкой катался на "Мерседесах" и строил грандиозные средневековые замки из поролоновых кирпичей, дедушка проводил систематические опыты по изучению структуры и образованию вихрей.

Динамику образования и существование вихрей лучше всего наблюдать при просмотре видеофильма. Но статью пришлось проиллюстрировать наиболее яркими кадрами из него. На рисунках с первого по шестнадцатый представлены фрагменты этого фильма.

В самом начале, после раскрутки, покоящаяся жидкость начала вращаться и было заметно, что снизу, со стороны доньшка, начали появляться и подниматься вверх по спирали отдельные пузыри (рис. 1 - 2). Видимо, из-за очень больших скоростей вращения создавались локальные зоны разрежения, и жидкость начинала кавитировать. При дальнейшей раскрутке кавитация усиливалась, количество пузырей увеличивалось, образуя весьма ощутимую дискретную массу (3 - 6). Эта масса постепенно приобретала более понятную сплошную форму в виде тела, формирующегося вблизи оси вращения. Далее эта масса приобретала все более четкие очертания и собиралась в компактную спиралевидную трубку с переменной площадью поперечного сечения (7 - 11). Трубка в виде ножки снизу и в виде шляпки сверху постепенно из дискретной превращалась в сплошную непрерывную (12 - 13). Парогазовая смесь из отдельных дискретных пузырьков сливалась в одну единственную, образуя монолитный вихрь (14). Образование сплошного вихря происходило снизу по направлению от доньшка установки вверх. Все большие и большие высоты покорял этот вихрь. Из фотографий видно, как он поднимается вверх, вытесняя дискретную субстанцию (13). В конце концов этот вихрь

сформировался и приобрел совершенно четкие очертания. Он стал спиралевидный, как танцующая кобра (15): подобие хвоста снизу и расширяющаяся очкастая голова сверху. Ну это для впечатления, а по существу, верх вихря представлял из себя воронку с гиперболической образующей. Воронка постоянно вращалась, но существенно медленнее скорости вращения основного потока. Она постоянно медленно поворачивалась, позволяя рассмотреть ее особенности. Начиная с определенного момента, но уже в обратном направлении сверху вниз, начинался процесс образования плетенки. Поток из условно гладкого превращался в закрученный сложным образом канат (16). Периодические, регулярные структуры распространялись сверху вниз достаточно быстро, заполняя всю массу новообразования следами вихревых и торсионных движений.

Сформированный вихрь был очень устойчив. Он прочно держался на ножке на протяжении долгого времени, не меняя своей формы. Вихрь имел четкие, регулярные, рельефные и очень впечатляющие очертания. Циклическая структура его локальных особенностей просто завораживает. Его стабильность и неразрушаемость вселяли уверенность в надежность, постоянство и крепость законов мироздания. Его красота вселяет оптимизм и желание познания.

Итак! Какие выводы можно сделать из сказанного?

1. Динамика возникновения, формирования и существования вихря является процессом универсальным. Его трехмерная структура всегда будет иметь три условные элемента: ножка, тело и воронка.
2. Двумерный вихрь будет иметь тороидальную форму.

### Литература

1. Г.В. Смирнов. Рожденные вихрем // М. изд. Знание, 1982 г.
2. Ю.Д. Чашечкин. Структуры и динамика природных течений: теоретическое и лабораторное моделирование. Юбилейный сборник "50лет институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН", М. Наука, 2015 г.
3. В.А. Князев. Гидромеханика без гипотезы псевдоотвердения жидкой точки, изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2014 г.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность газовых гигантов // Двигатель №6, 2016 г.
5. Ю.М. Кочетков, Т.Н. Кравчик, О.А. Подымова. Пять теорем турбулентности и их практические приложения // Вестник машиностроения №7, 2019 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

## ИНФОРМАЦИЯ - "Реактивный квадрокоптер"

Американская компания FusionFlight представила беспилотник AB5 JetQuad - первый в мире реактивный квадрокоптер, у которого вместо четырех электродвигателей с пропеллерами установлены четыре микротурбинных реактивных двигателя, суммарной мощностью 200 л.с. (149 кВт) на максимальных оборотах. Система управления вектором тяги двигателей позволяет этому беспилотнику вертикально взлетать и садиться, зависать и осуществлять горизонтальный полёт. Скорость горизонтального полёта более 300 миль в час (почти 500 км/ч).

Собственная масса летательного аппарата

составляет 23 кг, а с полным баком топлива - 41 кг. 19 литров дизельного топлива хватает на 30 минут для взлёта и висения на одном месте или на 15 минут для взлёта и горизонтального полёта на максимальной скорости. Преимущество перед электрическими квадрокоптерами с пропеллерами - высокая скорость полёта и, соответственно, быстрая доставка полезной нагрузки (как гражданского, так и военного назначения).

Максимальная масса полезной нагрузки составляет 18 кг, причём она может крепиться как на корпусе беспилотника, так и подвешиваться снизу на тросах. Реактивные



струи от реактивных двигателей сориентированы так, что они не могут повредить подвешенный снизу груз.

Ожидается, что AB5 JetQuad появится на рынке в 2021 году, а его стоимость будет \$200-250 тыс. в зависимости от модели и устанавливаемого оборудования.