

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

ТОРСИОННЫЕ ЖГУТЫ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Установлен новый газодинамический эффект, заключающийся в экспериментальном получении торсионных жгутов. Дано объяснение появления торсионных жгутов как результата деформации вихрей Тейлора-Гёртлера при переходе течения в безградиентное.

A new gas-dynamic effect, which consists in. experimental obtaining of torsion bundles is found. The explanation of appearance of torsional twists as a result of deformation of Taylor-Görtler vortices at the transition in gradientless flow.

Ключевые слова: турбулентность, вихрь, волна, торсионный жгут.

Keywords: turbulence, vortices, waves, torsion twists.

В предыдущей работе [1] были разобраны причины возникновения и области устойчивости газодинамических конфигураций, проявляющихся в виде вихрей Тейлора-Гёртлера. Была показана причина появления таких, всегда парных вихрей, заключающаяся в образовании при определённых условиях бифуркаций при торцевом натекании на стенку сопла. Было показано, что от отношения величины положительного градиента давления и центробежной силы, порождаемой кривизной вогнутой стенки, зависит размер и количество продольных вихрей вблизи максимальной величины деформации контура, в частном случае вблизи максимального разгара в процессе работы уносимого сопла. Говоря о парности вихрей, необходимо добавить и мысль о том, что при расположении их вдоль окружности формируется такая плотная упаковка (в виде замкнутой цепочки), при которой следует уже говорить о чётности одиночных вихрей. Более того, забегая вперёд, отметим, что в будущем разговор будет идти не только о чётности единичных вихрей, но и о чётности парных вихрей. То есть условиями равновесия торсионных жгутов, как будет показано далее, будут условия именно чётности парных вихрей.

Экспериментально уже было показано [1], что зарождению вихрей Тейлора-Гёртлера предшествует некий удар о поверхность с последующей бифуркацией течения. На рис. 1 [2] чётко видны



Рис. 1

седловые особые точки, полученные в экспериментах при исследовании обтекания уступов. Распространяясь в разные стороны от них, поток формируется в продольные вихри, винтообразно закрученные. Эти вихри представляют собой весьма устойчивые конфигурации, и они не меняют местоположения даже при повторных запусках, включающих переборку конструкции с изменениями угловых координат вставных деталей относительно первоначальных. Более того, случайная установка, например, уносимого фторопластового сопла с цилиндрической обечайкой, относительно фиксирующего станка, не приводит к размазыванию и сглаживанию первоначальных структур. Повторные запуски делают эти структуры более крупными и рельефными, повторяющими в точности исходные.

Такая устойчивая картина на поверхности существует до тех пор, пока в потоке фиксируется положительный градиент давления $dp/dx > 0$.

В случае если градиент давления отсутствует, то есть dp/dx становится равным нулю, устойчивость вихрей Тейлора-Гёртлера нарушается. Это возможно при условии, когда контур канала становится либо цилиндрическим, либо плоским. В этом случае стати-

ческое давление вблизи стенки не изменяется $p = \text{const}$. При этом новым устойчивым состоянием становятся формирующиеся на базе вихрей Тейлора-Гёртлера торсионные жгуты. Этот новый эффект обнаруживается при экспериментальных исследованиях в диапазоне областей названных выше параметров ($dp/dx = 0$).

В литературе отсутствует описание подобных устойчивых структур и, тем более, их математическая интерпретация. Это - вновь открытые конфигурации, которые являются логическим продолжением описанной ранее цепочки устойчивых формообразований, объясняющих постепенный последовательный переход от ламинарного течения к турбулентному. Ранее [3] автор уже упоминал о таких образованиях. Была качественно на основании проведённых экспериментов воспроизведена картина течения в этих условиях (рис. 3 - 6 в работе [3]). Она представляла собой некую когерентную структуру, состоящую из туго свитых продольных вихревых трубок Тейлора-Гёртлера, попарно расположенных вдоль стенок сопла.

Описание эффекта. Новые конфигурации потока

Первоначально эффект торсионного жгута удалось зафиксировать вследствие глубокого анализа отпечатков после экспериментов, которые оставлял высокоэнтальпийный поток продуктов сгорания на стенках выгораемых фторопластовых сопел. Если до определённого времени о волнах Толмина-Шлихтинга и о вихрях Тейлора-Гёртлера было хоть что-то известно, и было ясно, что соответствующие следы на стенке остаются в виде волновых поверхностей и продольных цилиндрических углублений, то про ячеистую структуру не было известно ничего.

Вглядываясь в эту структуру, можно было точно сказать, что:

- структура очень устойчивая и от запуска к запуску только увеличивается в размерах, практически не меняя своей формы;
- форма ячеек, расположенных в шахматном порядке, представляла собой фрагмент жгута, вдавленный в податливую поверхность;
- направление (скрутка) жгута было противоположно такому же жгуту, расположенному рядом, а максимумы, то есть выступающие части, касались друг друга;
- картина, состоящая из таких плотно расположенных следов от жгутов на поверхности стенки, представлялась весьма циклической, возможно было выделить условную длину цикла.

При рассмотрении данной структуры после экспериментов сразу приходит в голову, что, действительно, огневая поверхность сопла тщательно уложена набором жгутов в виде домотканной циновки. Но! Ведь известно, что если взять два гибких прутка, например, из упругой вакуумной резиновой трубки и попробовать их скрутить как электрические провода, то как только мы перестанем их держать, они раскрутятся. То есть такая система не будет устойчива, и не поддерживает заданную ей первоначально форму. Упругие силы после снятия с системы внешних связей исчезнут, а прутки не смогут остаться в заданном положении.

Далее вспомним, как изготавливается законцовка пастушьего кнута (хлыстик). Внешне она тоже похожа на скрутку из двух электрических проводов. Но! При её изготовлении используется в отли-

чие от скрутки древнее русское ремесло - витьё. В последнем случае упругие прутки (а точнее - пучки конских волос) подвергаются кручению. Каждый из двух пучков скручивается в направлении навстречу друг другу. При этом концы зафиксированы. Такое кручение равносильно локальному вращению в каждом сечении, и поэтому векторы их угловых скоростей направлены в разные стороны, а касательные скорости - навстречу друг другу. Пастух это делает двумя большими пальцами рук, фиксируя двумя указательными пальцами нижние волоски. После чего делается поворот одного скрученного жгута относительно другого. Далее процесс повторяется. Жгуты при этом сильно прижимаются друг к другу и благодаря силам трения удерживаются от раскручивания, приобретая равновесие. Если теперь попробовать раскрутить образовавшийся жгут, то для этого понадобится значительное усилие, а после снятия нагрузки пучок вернётся в первоначальное закрученное положение. Опыт исследования таких конских хлыстиков для функционального завершения конструкции пастушьего кнута положительно показывает себя на практике и постоянно демонстрирует прочность подобного соединения. Даже при многократных оглушительных ударах кнута хлыстик не рассыпается на отдельные конские волоски, а долго и надёжно обеспечивает работоспособное состояние кнута.

Но сказанное выше - лишь близкие аналогии к рассматриваемому в данной работе вопросу. Для использования этих аналогий применительно к рассматриваемой задаче потребуется понять сходство их с процессами, происходящими при вихревых течениях в каналах. Для этого воспользуемся универсальностью законов механики сплошных сред. Прежде всего, представим себе линию тока в газе или жидкости, как некий упругий твёрдый элемент (по сути дела - аналог рассмотренного выше конского волоса).

Действительно, принимая такую концепцию, мы гарантируем себя от нарушения однозначности; мы отвергаем случайность в газодинамических процессах и всегда можем быть уверены в том, что задавая в расчётных исследованиях однозначные граничные и начальные условия, получим однозначные решения. Всякую случайность отнесём к суетливости человеческого мышления или, как говорил великий Лаплас, к несовершенству измерений в экспериментах.

Итак, считаем турбулентное течение прядью запутанных конских волос, которые можно ещё больше запутать, повышая градиент давления $dp/dx > 0$, и совсем распутать, расширяя поток и снижая его давление $dp/dx < 0$.

Диапазон устойчивых состояний торсионных жгутов

Переходя к исследованию механизма образования турбулентных течений в виде торсионных жгутов, исследуем процесс преобразования течения Тейлора-Гёртлера при условии постоянного градиента давления. Как было сказано ранее, продольные вихри Тейлора-Гёртлера (вихревые трубки) существуют лишь в случае положительного градиента давления в потоке. Только при наличии нормальных к стенке течений, чему способствует $dp/dx > 0$, возникают продольные кратные вихри, у которых естественно имеются свои вращательные моменты количества движения. Эти моменты сбалансированы между собой вдоль окружности. Они подчиняются закону сохранения момента количества движения, из которого следует [4], что изменение суммарного момента количества движения относительно выбранной оси равно сумме моментов импульсов всех сил, приложенных к телу относительно той же оси

$$d \sum m \cdot (V_x \cdot Z - V_z \cdot X) = M_y d\tau.$$

Это означает, что если на систему воздействует постоянная нагрузка в виде системы моментов, то эта нагрузка не изменяется. То есть вихри Тейлора-Гёртлера будут оставаться всегда стабильными и по размеру не изменятся. Если же, что имеет место в нашем случае, градиент давления dp/dx станет равным нулю, то есть момент количества движения исчезнет, то возникнет продольный профиль моментов. На границе вихревых трубок он будет максимальным, а в области, перешедшей к условиям $dp/dx = 0$, он будет нулевым. Из-за этого перехода между двумя парными вихревыми трубками возникает кручение. Две крайние соседние вихревые

трубки начинают под действием силы кручения скручиваться. То же самое происходит и с остальными вихревыми трубками. Тогда становится очевидным, что количество вихрей должно быть четырёхкратным. В противном случае не установится равновесие между кручением и вязким трением, которое удерживает систему в балансе.

Диапазоны устойчивых состояний образовавшихся торсионных жгутов, будут зависеть, безусловно, не только от наличия $dp/dx = 0$ в потоке, но и от других условий, приводящих систему к аналогичному случаю. Так, например, эквивалентные условия dp/dx можно воспроизвести, регулируя течение формой проточного канала, либо подбором шероховатости стенки. Полученные устойчивые образования напрямую связаны с процессами кручения потока. Это наиболее высокодифференцированное образование, которое в математической интерпретации в соответствии с теоремой 1 [5] может быть представлено в самом общем виде так

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{4} \text{rotrot} \vec{V}.$$

И, действительно, если рассмотреть ситуацию с геометрической стороны, то сразу станет понятным, что первый ротор от вектора скорости даёт физически привычную величину, угловую скорость вращения. Это - тоже вектор, $\vec{\omega}$, а точнее целое поле векторов угловых скоростей. Но если взять от этого вектора второй ротор $\text{rot} \vec{\omega}$, то мы получаем уже кручение. Ранее неоднократно автором было показано, что любое воздействие оператора ротор на вектор скорости $\vec{V}$ приводит к изменению его направления строго на 90° . То есть $\vec{V} \perp \text{rot} \vec{V}$. Тогда по аналогии $\vec{V} \parallel \text{rotrot} \vec{V}$. Это означает, что вектор кручения потока совпадает по направлению с вектором скорости. Вот почему вихри Тейлора-Гёртлера перпендикулярны торсионным векторам. Этот факт для газовой динамики имеет принципиальное значение. Он объясняет внутреннюю взаимосвязь всех четырёх элементарных движений: поступательного, волнового, вихревого и торсионного.

Экспериментальные факты, полученные на модельных РДТТ

Эксперименты с применением фторопласта (ФП), как уносимого материала и модельного РДТТ, выбраны неслучайно, поэтому они были выделены в отдельный раздел. Дело в том, что только такое сочетание, как ФП + РДТТ даёт возможность получить чёткое изображение тонких структур турбулентности. Все возможные сглаживания, связанные с дегоранием, последующим расплавлением материала и прочими нюансами исключаются при таком уникальном сочетании причины и следствия.

Приведём два наиболее характерных экспериментальных результата:

1. Полученные в динамике ($\tau = 1,25$ с; $2,5$ с и $3,75$ с) отпечатки на внутренней поверхности газова, работающего на продуктах сгорания твёрдого топлива (рис. 2);

2. Результаты разгара в закритической части и за уступом разрезного управляющего сопла (РУС) РДТТ (рис. 3).

Первая серия экспериментов характерна тем, что газовад имел достаточно протяжённую поверхность в области критического сечения сопла, близкую к цилиндрической. Такие конструкции часто используются в авиационной промышленности. Сделано это было для того, чтобы умышленно растянуть зону безградиентного течения.

Анализ результатов, полученных в ходе испытаний, показал наличие чётко сформировавшихся двух зон. Закритическая часть (здесь фторопласт стоял за тугоплавким сплавом) сформировалась в виде, так называемой, "закритической ямы". Она имела характерную для этой области поверхность с сильно развитой кривизной. Не случайно вдоль оси этой осесимметричной поверхности сформировались вихри Тейлора-Гёртлера. Эти вихри по размерам весьма близки к величине максимальной глубины "ямы". Вихри - практически цилиндрические, что говорит о выполнении закона о моменте количества движения. Здесь следует отметить, что количество вихрей, как показали их обмеры, является кратным, и все они укладываются на окружности газовада равномерно. Было также установлено,

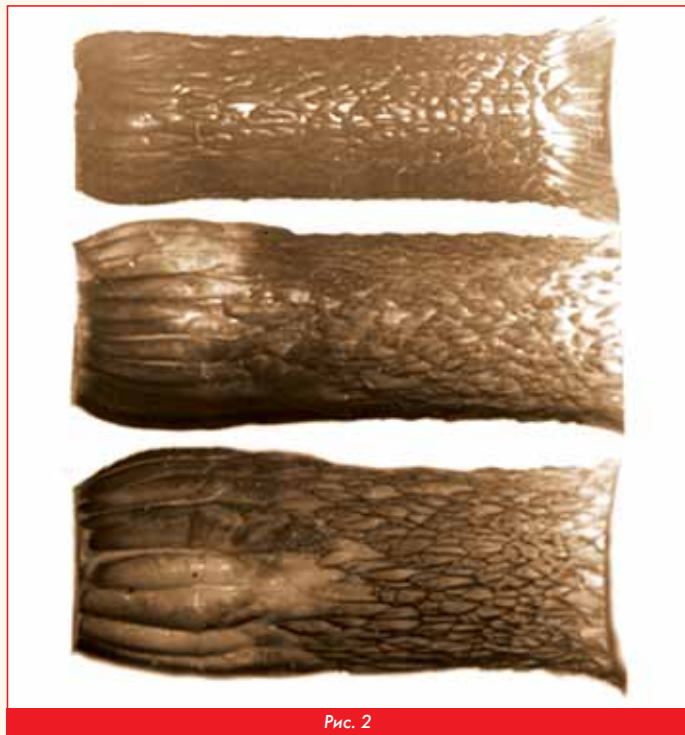


Рис. 2

что диаметр вихрей увеличивается пропорционально времени работы двигателя, что говорит о практически постоянной скорости уноса материала в этой области.

В зоне, где профиль газовада становился практически цилиндрическим, на внутренней поверхности имеются следы в виде отпечатков торсионных жгутов. Конечно, получить идеальную картину отпечатков жгутов, где можно было бы разложить все периоды и длины волн, как правило, не удаётся, но качественная картина, которая в достаточной для анализа мере отражает объясняемый эффект, была получена. На уносимой поверхности чётко видны чередующиеся практически в шахматном порядке ячеистые образования, по размеру совпадающие с диаметрами исходных вихрей Тейлора-Гёртлера. Продолжительный участок на цилиндрической поверхности подтверждает высокую стабильность торсионных жгутов.



Рис. 3

При этом совершенно очевидно, что их природа и динамика изменения по длине одна и та же для различных времён фиксации.

Аналогичная картина была получена на поверхности разрезного управляющего сопла (рис. 3). Кроме того, что явилось совершенно неожиданным, были отмечены следы вихрей Тейлора-Гёртлера и торсионных жгутов. Особенно следует отметить следы Тейлора-Гёртлера за уступом данного сопла. Несмотря на то, что эти вихри следовали прямо за торсионными жгутами, они не изменили своей формы по отношению к характерной для этих условий тече-

ния. Это говорит о том, что главной причиной является сформировавшаяся кривизна линии тока непосредственно за уступом, которая всегда преобладает над условиями течения перед уступом. Поток как бы заново сформировался и приспособился к условиям расширения в донной области с последующими условиями сжатия при ударе после отрыва за уступом.

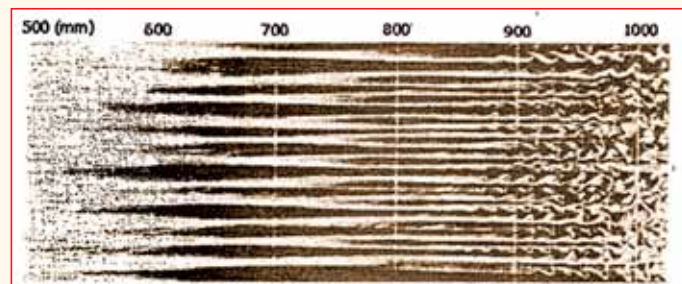


Рис. 4

Дополнительные факты, подтверждающие эффект

Всегда, когда появляется возможность доказать тот или иной факт, зафиксированный либо путём умозаключения, либо полученный экспериментально, хочется это подтвердить дополнительно экспериментами из другой области знаний. В данном случае представилась такая возможность, и её можно было констатировать как независимое доказательство утверждаемого факта. Это - два уникальных события, которые были зафиксированы независимо:

1. При исследовании Накаямой [6] воздушных вихрей Тейлора-Гёртлера на криволинейной поверхности (рис. 4);
2. Превосходная фотография в виде жгута из облаков, представленная фирмой Microsoft (рис. 5).

По рис. 4 следует дополнительно сделать следующие комментарии. Интерпретация, данная автором Накаямой, точно лишь до участка сопряжения с плоскостью в том месте, где чётко прочерчиваются продольные борозды. Непосредственно после этих борозд уже на плоскости наблюдаются переплетающиеся структуры - торсионные жгуты. Это - практически единственный, имеющийся в настоящее время в литературе экспериментальный факт, иллюстрирующий объёмное изображение торсионных жгутов.



Рис. 5

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вихри Тейлора-Гёртлера. // Двигатель № 3, 2014 г.
2. Г.Ф. Готов. Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях. г. Жуковский, ЦАГИ, 2003 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность, вихри и жгуты. // Двигатель № 4, 2005 г.
4. Г.Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика. М. Государственное издательство технико-технической литературы, 1953 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Торсионно-волновая парадигма. // Двигатель № 4, 2011 г.
6. Y. Nakayama. Visualized Flow, Pergamon, Oxford, 1988.

Связь с автором: swgeorgiy@gmail.com