УДК 532.2

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ БЕНАРА

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Проанализирован принцип самоорганизации устойчивых гидродинамических структур. Изложен механизм самоорганизации вихрей Бенара. Показана возможность существования устойчивых непрерывных и дискретных турбулентных образований.

Theprinciple of self-organizing of sustainable hydropower dynamic structures is analyzed. The mechanism of self-organization of Benar dvortices is set out. The possibility of the existence of stable continuous and discrete turbulent formations is shown.

Ключевые слова: ***турбулентность, вихрь, волна.***

Keywords: ***turbulence, vortex, wave.***

Разрешая проблему турбулентности, традиционно оглядываешься на предшественников, и всегда натыкаешься на искушение в один прекрасный момент свалиться на позицию случайности. На каждом шагу тебя ждёт какой-то странный аттрактор или примитивные последовательности Митчела-Фейгенбауэра, которые на пальцах показывают возможность "универсального" перехода к хаосу путём бифуркации удвоения периода. При этом говориться, что предсказать турбулентность нельзя. Её можно только статистически охарактеризовать всевозможными корреляционными моментами, непонятными пульсационными энергиями и многообразием различных колебаний с несоизмеримыми частотами. Получается так, что всё тонет в каком-то страшном беспорядке и получить более или менее конкретный ответ на конкретный вопрос, просто не возможно. Вся современная газовая динамика, ну почти вся, как правило, построена на уравнениях Рейнольдса. Практически все программные продукты содержат эти уравнения с теми или иными моделями турбулентности. Известно, что по воле их создателя, Осборна Рейнольдса, физические процессы, которые они описывают, наполовину (то, что по "руслу") - однозначные, а наполовину (то, что поперёк) - случайные. То есть в общем - случайные. Но! В нашем мире, который создал Бог, ничего случайного нет. Это мы здесь - случайные. Поэтому мы и пытаемся разобраться в том, что Он создал. А разбираясь, порой приходим к случайным интерпретациям Его творений. Конечно, очень просто взять и загнать всё в режим динамической стохастичности, осуждая при этом абсолютно трезвую точку зрения великого учёного всех времён и народов Пьера Симона Лапласа, который утверждал, что все законы природы подразумевают полную предсказуемость и строгий детерминизм. Наверное, поэтому все научные достижения Лапласа являются точными и однозначными. Наверное, поэтому ни одна статистическая теория никогда не сможет объяснить такие замечательные проявления турбулентности как вихри Тейлора-Гёртлера, градиентные волны Кельвина-Гельмгольца и торсионные жгуты. Статистическая теория не способна дать ответ: почему на разгоревшейся поверхности сопла РДТТ появляются устойчивые когерентные структуры, а не та отполированная поверхность, которую пророчит упомянутая теория.

В работах автора ранее уже было сказано и на примерах показано, что всю турбулентность можно представить, как последовательность устойчивых структур - солитонов. На сегодняшний день известно несколько устойчивых состояний потока, которые могут быть сформированы из элементарных движений. Так, например, те же самые вихри Тейлора-Гёртлера являются винтовыми течениями. Торсионные жгуты формируют сложные движения, включающие в себя вращение потока и его кручение. Одиночные срывающиеся вихри в потоке за препятствием предполагают вращение и поступательное движение.

К числу таких устойчивых образований движущейся сплошной среды следует отнести тороидальные вихри Бенара. Это - поистине уникальное проявление природы, которое ярко и дерзко демонстрирует высшую её упорядоченность и красоту. В противоположность вымышленным спонтанным объяснениям реальных процессов, преследующим сглаженность и осреднение локальных особенностей. Факт такого проявления выглядит как пример высшей самоорганизации и внутренней крепости, окружающей нас природы.

Эффект Бенара

Как и все великие открытия, вихри Бенара были сделаны случайно. Генри Клод Бенар - великий французский учёный, помимо прочих своих великолепных научных достижений исследовал на парафине вопросы конвекции при заданном перепаде температур. В процессе нагревания плоской сковороды, заполненной до заданного уровня парафином, он неожиданно обнаружил на поверхности расплава "полуупорядоченные" структуры. Учёный подумал о том, что, если эксперимент подготовить более тщательно, то можно получить строго упорядоченную картину процесса кипения. Для этого Бенар организовал равномерный нагрев снизу медного днища, расположенного строго горизонтально. При этом уровень исследуемой жидкости был параллелен днищу, что обеспечивало его одинаковую толщину. В результате эксперимента была получена строго упорядоченная структура в виде регулярно расположенных гексагональных ячеек. При этом было отмечено, что конвективные потоки жидкости поднимались и выходили наружу через центры этих ячеек. А сток жидкости происходил по периферии каждой из ячеек. Таким образом, в каждом осевом сечении возникало циркуляционное движение. Ячейки по форме представляли собой плотноупакованные деформированные торы. Система была очень устойчива и со временем её форма не изменялась.

Генри Клод Бенар

В дальнейшем этим эффектом заинтересовались многие известные учёные, в том числе лорд Релей, принявший активное участие в объяснении данного эффекта и разработке своей теории. Другие авторы многократно повторяли экспериментальные исследования, начатые Бенаром. Для своих экспериментов они исследовали различные вязкие жидкости, в том числе минеральные масла. Так, например, на рис. 1 представлены результаты экспериментов, полученные в нагретом сосуде с плоским полированным медным дном с применением тонкого слоя силиконового масла с кинематической вязкостью 0,5 см^2/с. Дно поверхности нагревалось равномерно, что было главным критерием симметричности картины. На рисунке резко выделяется участок с проявившейся несимметрией, что явилось результатом присутствия на поверхности маленькой выемки. Результат был получен Кошмидером в 1974 году, и приведён в известном альбоме Милтона Ван-Дайка.

Рис. 1

Картина, представленная в плане, наглядно демонстрирует равномерность и периодичность вихрей Бенара. Добавленные в силиконовое масло частицы мелкодисперсного алюминиевого порошка позволили отследить с течением времени их движение вдоль линии тока. Также было зафиксировано направление движения из центра тороидального вихря вверх и в дальнейшем по окружности к периферии.

Специальные расчётные исследования позволили проанализировать движение жидкости в осевом сечении. Было показано, что течение очень похоже на аналогичное в дымовом кольце. Для иллюстрации на рис. 2 приведены экспериментальные дымовые линии тока в виде замкнутых кривых, похожих на деформированную окружность. Кривые наглядно демонстрируют пространственную структуру дискретного турбулентного течения в дымовом кольце и одновременно в тороидальном вихре Бенара. Глядя на общую картину сверху, приходит в голову мысль о формировании не плотноупакованной системы кругов, а присутствие в системе плотноуложенных правильных шестиугольников. Картина представляется гексагонально отнормированной. Но это ощущение является лишь визуальным эффектом. Да, система несколько деформируется, и внешнее восприятие сглаживается в отличие от оригинального. Тем не менее, уже в этой обстановке можно считать, что система гексагональна. Именно гексагональная система является тем предельным случаем, при котором может реализоваться самая плотная упаковка. А именно, на определённой площади (в пространственном случае в объёме) может уместиться максимальное количество одинаковых плоских (объёмных) фигур. В данном случае кругов.

Рис. 2

Теперь о физике возникновения вихрей, или как их чаще всего называют ячеек Бенара. В литературе [1] их часто приводят как традиционный пример стационарной автоструктуры, которая возникает спонтанно в подогретом снизу слое жидкости (минерального масла). При этом разность температур между верхней и нижней плоскостями должна быть больше некоторой критической. Тогда возникает конвекция. Режим неподвижной теплопроводящей жидкости становится неустойчивым и на смену ему приходит устойчивый режим, характеризующийся наличием конвективных ячеек. В литературе также утверждается, что если размер сосуда большой, то параметры ячеек не зависят от формы и размеров сосуда.

Лорд Релей в своей линейной теории объясняет такое спонтанное наступление новой устойчивой структуры нарастанием широкого спектра пространственных возмущений. При этом, как он говорит, появляются резонансные возмущения определённого пространственного масштаба. По мнению Релея они являются причиной возникновения новых структур. Интерпретируя Релея, можно сказать, что хаотично блуждающие и как-то беспорядочно распространяющиеся возмущения (по сути дела, шумы) вдруг неожиданно, без всякой на то причины могут отыскать внутри себя какие-то резонансные условия, которые приведут к самоорганизации шумовой массы, и она станет упорядоченной. Складывается ощущение, что в этом месте лорд Релей не додумал. Может быть, какой-то внешний фактор должен повлиять на ситуацию, и как-то отобрать среди прочих эти резонансные масштабы? Да! И почему эта самая организация должна привести к выстраиванию в гексагональную структуру?

О других немногочисленных теориях больше говорить не будем. Они, как правило, являются вариациями изложенной. Попробуем разобраться в существе процесса.

О самоорганизации устойчивых структур

Устойчивая газодинамическая структура может возникнуть только в том случае, если среда, образующая ту или иную систему, попадает в условия, когда масштабы собственно системы и среды совпадают. Известно, что любое материальное тело, состоящее из твёрдого вещества, а также представляющее собой, например, упругую систему, состоящую из жидкости, газа и плазмы, которые заключены в какой-либо объём, обладают свойством собственной частоты. Всё, начиная от чугунной отливки и кончая Солнцем, обладает своей уникальной собственной частотой. Характерно то, что собственная частота не зависит от процесса. Она зависит лишь от массы и конструкции тела (рабочего тела). Это означает, что любое тело имеет свой характерный размер. Последнее понятие может выглядеть достаточно абстрактно. Но! Являясь одной из важнейших составляющих в сложной математической комбинации, определяющей собственную частоту, оно может в конкретной задаче определять направление к равновесию данной системы. Например, математический маятник имеет в формуле для собственной частоты один единственный размер - длину нити, и этот размер определяет то устойчивое колебательное состояние, которое и является условием равновесия после состояния покоя.

Классическим примером устойчивости является состояние подвижной сплошной среды в условиях реализации вихрей Тейлора [2]. Главный вопрос, который встаёт перед исследователями: *"Почему газодинамический процесс так самоорганизовался, что возникли тороидальные вращающиеся движения?"*. Это произошло, потому что уже заранее было известно, в каких условиях этот процесс будет происходить. Это - условие геометрического ограничения. Щель, заранее выставленная перед испытаниями, явилась тем характерным размером, который определил диаметр окружности, вдоль которой должна вращаться жидкость.

Второй пример не менее показательный. Это образование

Рис. 3

устойчивых структур в виде волн Толмина-Шлихтинга. В этом случае уже напрямую следует говорить о совпадении рабочей частоты с собственной частотой в системе [3]. Характерный размер, о котором шла речь выше, уже заложен в собственной частоте.

Таким образом, чтобы говорить о самоорганизации устойчивой структуры, прежде всего, следует говорить о нахождении характерного размера, который определяет форму устойчивой системы. Посмотрим на известные факты применительно к вихрям Бенара:

1. Очевидно, что толщина масла Δ на нагреваемой поверхности зафиксирована;

2. Экспериментально показано, что вращение подогретой снизу жидкости происходит вдоль образующей окружности тора по направлению вверх из его центра к периферии;

3. Периферийный диаметр тора равен двум диаметрам его образующих $D = 2d$;

4. Диаметр образующей примерно равен толщине жидкого слоя на плоской поверхности $d \approx \Delta$.

Теперь чисто геометрическим путём покажем, как может сформироваться устойчивая структура на плоскости. Очевидно, что на плоскости сформируется в определённом месте хотя бы один тор, обладающий перечисленными свойствами. Поскольку нагрев происходит равномерно по всей плоскости, то же самое произойдёт и в непосредственной близости и на значительном расстоянии, а точнее по всей поверхности горячей пластины. При определённых условиях по температуре $\Delta T = \Delta T_{кр}$ появится наибольшее количество таких торов. Но поскольку они будут все равноценны в силу симметрии и близости условий эксперимента, они "упакуются" наиболее плотно. Известно, что самая плотная упаковка кругов на плоскости - гексагональная. Конечно, при этом форма подвижных тороидальных ячеек будет несколько деформироваться в сторону заполнения пустот и в пределе превратиться в шестигранную призму. Такая гидродинамическая система будет весьма устойчивая. Ведь каждая грань призмы будет соприкасаться с внешней, и создавать парную вращающуюся систему. Все частицы жидкости, находящиеся на любой из граней, будут стекаться со смежными, расположенными рядом гранями. Такая возможность вращения частиц шестигранной формы является единственной среди всего многообразия других геометрических форм. Только при плотном размещении шестигранников на плоскости может образоваться устойчивая структура - структура Бенара.

Тороидальные вихри как пример дискретной турбулентности

Тороидальные вихри Бенара, пожалуй, самый яркий пример самоорганизации устойчивых систем и систем дискретной турбулентности. На его примере можно утверждать, что дискретные турбулентные потоки, наряду с непрерывными, могут быть весьма устойчивыми и долгое время, если не будут возникать соответствующие причины, находиться в устойчивом состоянии. Помимо вихрей Бенара уже упоминались дымовые кольца и вихри Тейлора. К ним также можно отнести вихри Тейлора-Гёртлера, которые могут долго и устойчиво существовать при условии положительного градиента давления [4].

Известно также, что при малых скоростях обтекания обратных уступов и донных областей образуются тороидальные вихри, соизмеримые с размерами их конструкций. К сожалению, визуализация подобных вихрей на сегодняшний день весьма проблематична. Поэтому, хотя это не совсем корректно, воспользуемся имеющимися в литературе экспериментальными фактами, полученными для плоских конфигураций, считая их аналогами. На рис. 3 изображены цилиндрические вихри, образовавшиеся за выступом и обратным уступом. Видно, что размеры вихрей, то есть их эквивалентные диаметры, соизмеримы с размерами прямоугольной преграды. На рис. 4 представлена картина течения за донным срезом. Видно, что половина ширины среза совпадает с диаметром образующей вращающегося цилиндрического вихря. Аналогичная картина возникновения цилиндрических вихрей представлена на рис. 5 [5]. Здесь показано натекание потока на затупленную преграду.

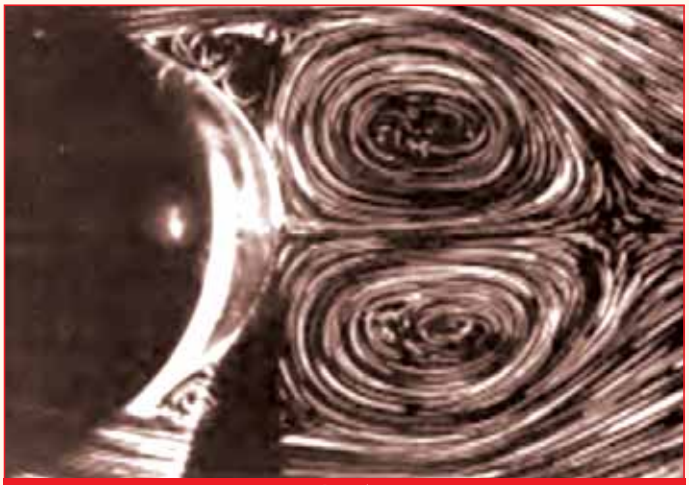

Рис. 4

Рис. 5

В трёх последних примерах геометрические размеры конструкций являются характерными размерами, определяющими устойчивость движения. Именно эти размеры отвечают за процессы самоорганизации дискретных гидродинамических структур.

Литература

1. Д.И. Трубецков. Введение в синергетику. Хаос и структуры. М. УРСС. 2004 г.

2. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М. Наука. 1974 г.

3. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков. Турбулентность. Волны Толмина-Шлихтинга. // Двигатель № 1. 2014 г.

4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вихри Тейлора-Гёртлера. // Двигатель № 3. 2014 г.

5. П. Чжен. Отрывные течения. М. Мир. 1973 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com