

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС

ОТ ЛАМИНАРНОГО К ВИХРЕВОМУ

ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ):

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор

Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель

На базе новых экспериментальных результатов, полученных методом горячей визуализации, а также теоретического анализа процессов турбулентных течений, был разработан метод прогноза их появления. Показано, что рассматриваемый традиционно переходный режим является волновым, развивающимся режимом, переходящим постепенно от волн Толмина-Шлихтинга к градиентным волнам Кельвина-Гельмгольца. Предельным состоянием, завершающим волновой переходный процесс, является наступление градиентной катастрофы, момент возникновения которой совпадает с началом турбулентности. Этим началом является факт появления первых вихрей – продольных вихрей Тейлора-Гертлера. В результате анализа установлены численные значения границ перехода и разработан метод прогноза турбулентности, заключающийся в анализе потока (дозвуковой или сверхзвуковой), режима обтекания тела или канала (анализ знака градиента давления) и собственно определение рабочего интервала по числам Рейнольдса. Установлено, что турбулентность наступит, если числа Рейнольдса попадут в интервал от критического значения до значения в критическом сечении сопла (критические условия по термодинамике).

On the basis of the new experimental results obtained by the hot visualization method, as well as the theoretical analysis of the processes of turbulent flows, a method for predicting their occurrence was developed. It is shown that the traditionally considered transition mode is a wave-like, developing mode that gradually transitions from Tolmin-Schlichting waves to gradient Kelvin-Helmholtz waves. The limiting state that completes the wave transition process is the onset of a gradient catastrophe, the moment of occurrence of which coincides with the beginning of turbulence. This beginning is the fact of the appearance of the first vortices—the longitudinal Taylor-Gertler vortices. As a result of the analysis, numerical values of the transition boundaries are established and a method for predicting turbulence is developed, which consists in analyzing the flow (subsonic or supersonic), the flow regime of a body or channel (analysis of the sign of the pressure gradient), and the actual determination of the working interval by the Reynolds numbers. It is established that turbulence will occur if the Reynolds numbers fall within the range from the critical value to the value in the critical section of the nozzle (critical conditions in thermodynamics).

Ключевые слова: турбулентность, градиентная катастрофа, ламинарно-турбулентный переход, прогноз турбулентности.

Keywords: turbulence, gradient disaster, laminar-turbulent transition, turbulence forecast.

Главная трудность экспериментального изучения турбулентности определяется двумя её характерными свойствами. Это быстротечность и мелкомасштабность. Эти два свойства, накладываясь друг на друга, не позволяют зафиксировать тонкие турбулентные структуры обычными методами. Ранее уже говорилось о методе горячей визуализации [1]. Он основан на анализе отпечатков на уносимой поверхности после воздействия на стенку высокоэнthalпийного потока. В качестве уносимых стенок для этого метода в основном применяются полимеры, разрушающиеся по законам линейного пиролиза. Чаще всего для этой цели в качестве материала используют фторопласт. На фторопласте отпечатываются четкие следы без замазывания даже самых мелких нюансов. На нём хорошо проявляются острые кромки, а поверхности на ламинарных участках выглядят отполированными. Учитывая, что в отличие от других полимеров фторопласт после выключения двигателя не догорает (как, например, полиметилметакрилат) и не плавится (как полиэтилен), на нем можно воспроизводить быстротечные и мелкомасштабные потоки. Особенно важной задачей турбулентности является задача ламинарно-турбулентного перехода. Смена режимов течения приводит к принципиально важным ситуациям при эксплуатации ракетных двигателей и промышленных энергетических установок, водного и воздушного транспорта, конструкций медицинского и бытового назначения. Наступление турбулентности резко меняет режим обтекания, меняет режим трения газа о поверхность. Она приводит к дополнительному нагреву конструкции, часто к прогарам. Турбулентность способствует возникновению низкочастотных и высокочастотных неустойчивостей. В настоящее время наступление турбулентности никак не объяснялось теоретически. Проводилось сравнение инерционных и вязких сил, что позволяло экспериментально найти критерий ламинарно-турбулентного перехода Рекр (критическое число Рей-

нольдса). Впервые численное значение его определил сам Осборн Рейнольдс, который и открыл явление турбулентности. А далее, после появления его работ, было много попыток уточнить эту цифру. В связи с этим уместно вспомнить выполненные беспрецедентно по охвату и точности работы Ивана Ильича Никурадзе. Его знаменитая графическая зависимость "Никурадзе по Рейнольдсу" (рис. 1) не потеряла до сегодняшнего времени и, видимо, никогда не потеряет своего значения в будущем. На базе этой зависимости было записано два важных закона. Это закон Гагена-Пуазейля для ламинарного течения и закон Блазиуса - для турбулентного. Закон для переходной области от ламинарности к турбулентности графически тоже был получен, и он укладывался в интервал по числам Рейнольдса от 1000 до 4000. Интересно, что

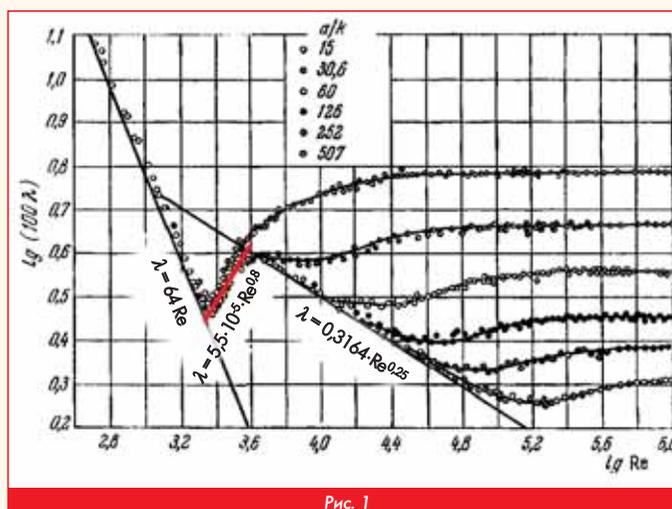


Рис. 1

критическое число Рейнольдса 2300 (для трубы) находится примерно в середине этого интервала. В работе [2] для этого интервала также была получена интересная закономерность. Для безразмерного трения получалась степенная зависимость с показателем 0,8. Аналогичная зависимость была получена Михеевым [3] для вычисления числа Нуссельта.

Многие работы говорят о том, что переходный период достаточно сложен по своей структуре и практически из-за малости размера не доступен для изучения. Поэтому отсутствуют работы по его исследованию: в литературе всё ограничивается качественным и, к тому же, неподробным описанием этого процесса, по которому практически нет методик расчёта трения и теплообмена. Основное изучение ведётся в ламинарных и турбулентных областях.

Экспериментальные предпосылки

При разработке теоретических основ ламинарно-турбулентного перехода будем базироваться на экспериментальных данных, полученных на модельных двигателях методом горячей визуализации. Одним из таких двигателей был двигатель с диаметром камеры 150 мм и диаметром критического сечения 22 мм [4]. Параметры в камере и сопле этого двигателя в зависимости от задачи могли быть представлены в самых различных вариантах, а их комплектация иметь самые различные конфигурации. Уносимые стенки соплового блока изготавливались из фторопласта, а температура обтекающих их продуктов сгорания была на уровне 3500 К.

Исследовались различные конфигурации каналов и сопел, но особый интерес представляло гладкое сопло Лаваля, которое с одной стороны позволяло представить геометрически трубу переменного сечения, а с другой обеспечить ускоряющийся поток с переменными градиентами давления. На рис. 2 и 3 показаны следы потока в зонах переходных процессов, находящихся непосредственно за зоной ламинарного режима.



Рис. 2



Рис. 3

Видно, что собственно область ламинарного течения на стенке абсолютно гладкая, как бы отполированная. За ней с некоторо-

го расстояния следует область, где пристенный поток собирается, причем его сборки представляют периодическую структуру и напоминают следы от волн. Это - волны Толмина-Шлихтинга. Характерным является их периодичность, совпадающая с периодичностью при линейном решении задачи об устойчивости. С увеличением числа Рейнольдса эта периодичность пропадает. Задача становится нелинейной. Такую задачу называют задачей Хопфа, она исследует градиентную волну в нелинейной постановке. Эта волна характерна тем, что удаленная от стенки верхняя часть волны ускоряется и первоначально синусоидальная волна вытягивается вперед, образуя несимметричную волну с наклоном к оси. Подобные волны называются градиентными волнами Кельвина-Гельмгольца. Градиентная волна сильно искривляет экспозиционную поверхность стенки модели. Часто такие волны Толмина-Шлихтинга, переходящие в градиентные волны Кельвина-Гельмгольца можно наблюдать на море. Так, удаленные участки морских слоев всегда практически ламинарные при шторме. Ближе к берегу они развиваются в синусоидальные и совсем при подходе к малым глубинам они становятся градиентными. Достигая определенных параметров, волны могут обрушиваться. Это предельная конфигурация волны. Тогда наступает градиентная катастрофа (рис. 4) - существование волнового периода течения на этом заканчивается.



Рис. 4

Можно считать, что ситуация подготовлена к переходу к турбулентности. Прежде чем перейти к следующей конфигурации еще раз сформулируем понятие турбулентность. Итак, турбулентность - это такая конфигурация течения, при которой обязательным атрибутом является присутствие в потоке вихря, то есть вращения ($rot\ v$) или более высокодифференцированной производной - кручения ($rotrot\ v$). Эти два оператора, один зависящий от другого, являются характеристиками турбулентности. Отсутствие вращения или кручения характеризует поток как ламинарный.

После сделанных определений вернемся к структуре потока. Да, волновой период течения закончен. Он начался с "мятых" волновых возмущений и достиг градиентной катастрофы. Оценки, проведенные по результатам описанных экспериментов, показали, что число Рейнольдса как в начале этого периода, так и в конце его приблизительно совпадают с границами интервала переходного режима течения [1000, 4000]. Данный качественный метод для количественных оценок недостаточно точен. Следует провести систематические исследования методом уноса массы и более точно получить эти границы, но в данный момент воспользуемся опытами Никурадзе, принимая отмеченные границы как границы волнового режима.

Что же дальше? Градиентная катастрофа явилась началом зарождения турбулентности. Внешний по отношению к градиентной волне поток, обтекаемый её в непосредственной близости, отрывается как за обратным уступом и падает на поверхность основания. Удар потока о жидкую поверхность основания является причиной появления вихрей Тейлора-Гертлера [5]. Такие вихри хорошо изучены и причина их появления - течение вдоль криволинейной поверхности, либо вдоль поверхности с резко изменяю-

щей кривизной. Падая под углом на эту поверхность, поток начинает двигаться в двух направлениях. Естественно - это продольное движение вдоль стенки, а так же, если это сопло или цилиндр, в аксиальном направлении. Но в аксиальном направлении он может двигаться только вращаясь совместно со сформировавшимися смежными вихрями. Другими словами, в определенном вязком слое потоком выбирается масштаб, в котором укладываются одинаковые по размеру вихри. Их вдоль окружности чётное количество. Они, естественно, парные и вращаются поочередно в разные стороны. Абсолютное движение этого потока у стенки - винтовое.

На рис. 5 показаны следы этих продольных вихрей, полученных за обратным уступом на поверхности сопла.

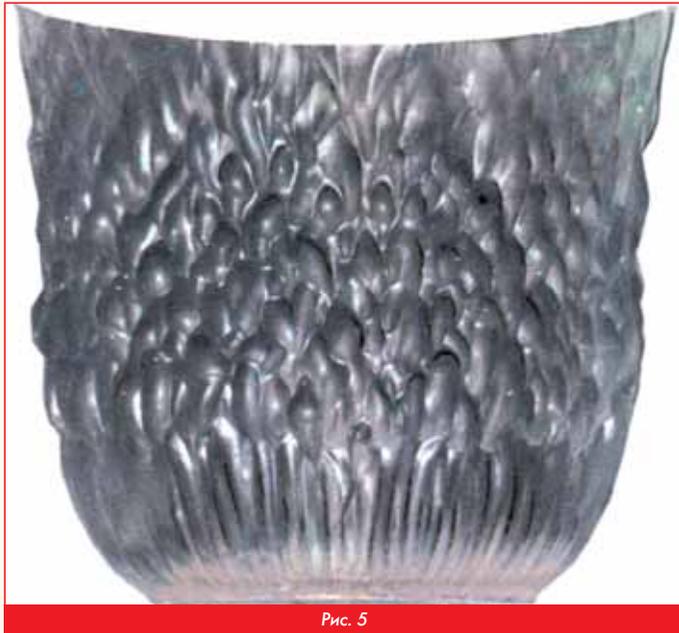


Рис. 5

Вихри очень регулярны и возможно произвести их количественную обработку. Но главное не их внешняя красота, а именно тот факт, что это те самые первые вихри, которые нам говорят о появлении турбулентности. Вот оно! Начало турбулентности. Это - появление первых вихрей. А ещё точнее - это градиентная катастрофа. То есть появление такой конфигурации градиентной волны Кельвина-Гельмгольца, при которой срывается омываемый изгиб (излом) её поток и образуются первые вихри. В работе [6] методом дымовой визуализации также удалось зафиксировать последовательные стадии ламинарно-турбулентного перехода. На рис. 6 четко видны зародившиеся продольные вихри.

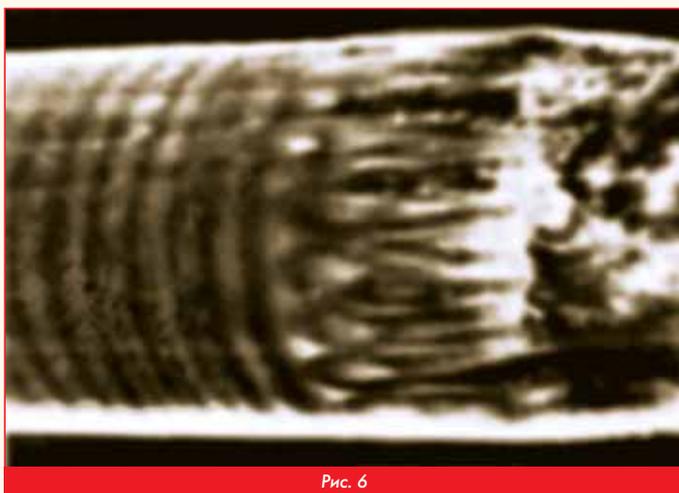


Рис. 6

Таким образом, в соответствии с проделанным анализом, следует считать критическим числом Рейнольдса правую границу волнового интервала $Re_{кр} = 4000$.

Теоретические предпосылки

Начало турбулентности можно описать теоретически с применением известных уравнений сохранения: импульсов, энергии, диффузии. Для этого сделаем некоторые векторные преобразования, выделив при этом уже известные особенности течения и его закономерности. Например, известно, что уравнение Навье-Стокса, записанное в векторной форме, характеризует некий вектор. Это вектор Навье-Стокса. А раз так, то это уравнение записано вдоль линий тока. Абсолютная скорость, относительно которой записано это уравнение, является касательной к линии тока, что означает правильность утверждения о том, что течение потока является одномерным. Для одномерного потока считается справедливым применение уравнения Бернулли и уравнения обращения воздействия Вулиса. Используя соответствующие преобразования [6], уравнение Навье-Стокса преобразуем в следующее уравнение, справедливое для турбулентного течения:

$$\text{rot} \vec{j} = \pm \sqrt{Re \frac{1-M^2}{d}} \text{grad} \vec{P},$$

где Re - число Рейнольдса для трубы;

M - число Маха по абсолютной скорости;

P - статическое давление.

Это уравнение будет необходимо при определении режима течения. Оно будет использовано для дозвукового течения, хотя справедливо и для сверхзвукового.

Далее выразим в более удобной форме для анализа число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}.$$

Путем домножения и деления выделяем расход:

$$Re = \frac{\frac{\pi}{4} \rho V d^2}{\frac{\pi}{4} d \mu} = \frac{G}{\frac{\pi}{4} d \mu}.$$

Находим относительное число Рейнольдса:

$$\frac{Re}{Re_*} = \frac{G d_{кр} \mu_{кр}}{G_{кр} d \mu} = \frac{1}{\bar{r} \bar{\mu}}.$$

Величина $\mu \sim 1$, тогда

$$\frac{Re}{Re_*} = \frac{1}{\bar{r}}.$$

Полученная формула утверждает, что самое большое число Рейнольдса будет в критическом сечении сопла, то есть при критических термодинамических параметрах. Из формулы также следует, что в сверхзвуковом сопле вниз по потоку число Рейнольдса будет стремиться к нулю.

Поскольку, в соответствии с пятой теоремой турбулентности в сверхзвуковом потоке она (турбулентность) отсутствует, то числа Рейнольдса, при которых поток будет турбулентным, находятся в интервале

$$Re_{кр} < Re < Re_*,$$

то есть они больше критического числа Рейнольдса, при котором наступает градиентная катастрофа, но меньше, чем значения в критическом сечении сопла, то есть меньше критических термодинамических параметров.

Следует отметить, что для внутренних осесимметричных течений значения чисел Рейнольдса берутся по трубе, и характерным размером является диаметр. Если течение внешнее и происходит обтекание тела, то, как правило, берут в качестве характерного размера длину образующей, а законы трения для пластины. Естественно, числа Рейнольдса будут другие. Если же обтекаемые тела имеют произвольную форму (не труба и не пластина), то остается вопрос о выборе характерного размера и критических чисел Рейнольдса для данного тела. Сложные формы, не приводящиеся к простым, подлежат специальному исследованию с помощью воздушных продувок, пролипок и прочее.

Методика определения режима течения

Всегда хочется сразу получить ответ на вопрос: "когда наступит турбулентность?" И тогда уже начать расчет для турбулентного течения. А лучше его совсем и не начинать. Хорошо бы все было ламинарным, потому что ламинарная задача как-никак, но считается. А вот турбулентная считается плохо. Все потому, что задача Навье-Стокса считается очень долго, даже для маленьких размеров. А задача Рейнольдса (по его уравнениям) считается, мягко говоря, не точно. Но, тем не менее, практические задачи требуют своего разрешения и при расчетах необходимо в непрерывном режиме находить границы ламинарно-турбулентного перехода. И прежде всего требуется определить какое реализуется течение: дозвуковое или сверхзвуковое. При сверхзвуковом - турбулентности не будет. Далее, если течение дозвуковое, то турбулентность может возникнуть только при положительном градиенте давления, либо при безградиентном течении. При отрицательном градиенте давления поток всегда разгоняется, что способствует распрямлению линий тока и ухода от турбулентности. Турбулентность может не начаться, если условия по Рейнольдсу не будут выполнены. Для начала турбулентности необходимо попасть в интервал по Рейнольдсу, заключенном между его критическим значением и значением в критическом сечении сопла или при критических термодинамических параметрах.

В настоящее время еще не разработана строгая теория развития волновой области течения. Это новое направление - нелинейная физика. Оно бурно развивается. Это теория солитонов, теория циклов Пуанкаре, нелинейная дифференциальная математика. Многие задачи в этом направлении, видимо, будут решаться в силу трансцендентности расчетным путем или с помощью синергетических подходов. Решение волновых течений в этом интервале теоретически позволит предсказать момент нас-

тупления градиентной катастрофы, а значит начала турбулентности. А пока эта граница определяется чисто экспериментальным путем. □

Литература

1. Ю.М. Кочетков "Турбулентность - не хаос, а тонко организованная структура" // Двигатель № 6, 2004 г.
2. Ю.М. Кочетков "Турбулентность в пограничном слое" // Двигатель № 6, 2013 г.
3. М.А. Михеев "Основы теплопередачи" // М. Государственное энергетическое издательство, 1949 г.
4. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Ю.М. Кочетков и др. "Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива" // М. Машиностроение, 2004 г.
5. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков "Турбулентность. Волны Толмина Шлихтинга" // Двигатель № 1, 2014 г.
6. Ю.М. Кочетков, Н.Ю. Кочетков "Турбулентность. Градиентные волны Кельвина-Гельмгольца" // Двигатель № 2, 2014 г.
7. Ю.М. Кочетков "Вихри Тейлора-Гертлера" // Двигатель № 3, 2014 г.
8. Kegelinan J.T., Nelson R.C. and Muelle T.J., "Smoke visualisation of the Boundary Layer on an Axisymmetric Body", AIAA Paper 79-1535, Aug. 1979.
9. Ю.М. Кочетков "Турбулентность и математическое доказательство её невозможности в сверхзвуковом потоке" // Двигатель № 2, 2018 г.
10. Ю.М. Кочетков "Турбулентность. Пять теорем как инструмент глобального преобразования уравнений сохранения в целях разработки новых подходов к вычислительной газовой динамики" // Двигатель № 4, 2019 г.

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ. Электрические самолёты

В 2017 году самолетом Extra 330LE компании Siemens был установлен рекорд скорости для электрических летательных аппаратов. Его электродвигатель массой 50 кг, развивая 260 кВт (при массе самолета всего 1000 кг) позволил разогнать летательный аппарат до 338 км/ч. В ходе другого полёта Extra 330LE поднял на буксире планер на высоту 600 м за 76 секунд.



Конструкторы утверждают, что шести таких двигателей будет достаточно для создания электрического самолета малого класса, рассчитанного на перевозку 19 пассажиров.

Прошло не так много времени, и к гонке конструкторов электросамолётов подключились специалисты компании Rolls-Royce, которые создали электрический самолет малого класса, получивший название Spirit of Innovation. Предполагается, что основное предназначение Spirit of Innovation - воздушные пассажирские перевозки на малые расстояния в качестве летающего такси.

В ходе выполнения первого этапа программы испытаний проверяется работа электрической двигательной системы. Пока самолёт совершает пробежки на взлётной полосе и рулежных дорожках аэродрома, но в ближайшее время он будет поднят в воздух. В одном из полётов предполагается достижение нового рекорда скорости в 300 миль в час (порядка 482 км/ч). Эту скорость обеспечит электрический двигатель мощностью 400 кВт (500 л.с.). Энергия для двигателя храниться в аккумуляторной батарее, составленной из 6 тысяч ячеек.



Несколько иной подход к созданию самолётов с электродвигателем у французских конструкторов из компании МАСА, которые решили отказаться от традиционной электрической схемы с аккумуляторными батареями в пользу системы с водородными топливными элементами. Такой подход объясняется основным предназначением проектируемого ЛА: участие в гонки на летающих автомобилях с электрической СУ подобно гонкам

Formula E электрических автомобилей. Наличие на борту водорода для работы топливных элементов позволит аппарату под названием Carcopter иметь достаточную дальность при выполнении частых разгонов и выполнении сложных маневров на гоночной трассе полёта.



Летающий автомобиль длиной 5 метров имеет кабину для одного пилота. Шесть электродвигателей с пропеллерами, суммарной мощностью 35 кВт, будут способны поднять этот вертикально взлетающий ЛА массой 600 кг в воздух и разогнать его до 250 км/ч.

В ходе испытаний и участия в гонках водородная система будет совершенствоваться и, в конце концов, руководство МАСА надеется получить законченную технологию, которую можно будет безопасно применять для обеспечения городских и междугородних воздушных пассажирских перевозок на этом летательном аппарате или подобных ему. □