

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ПЯТЬ ТЕОРЕМ КАК ИНСТРУМЕНТ ГЛОБАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ СОХРАНЕНИЯ В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ПОДХОДОВ К ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*Проведены глобальные преобразования уравнений сохранения и получены новые уравнения, значительно более простые и удобные для анализа процессов и программирования. Детально исследованы процессы течения в различных областях жидкостного ракетного двигателя и определены условия возникновения ключевых режимов газодинамики (ламинарность, турбулентность, неравновесность, неустойчивость). Предложен подход к созданию нового российского электронного продукта, позволившего в будущем надежно определять параметры газового потока с учетом реальных свойств.*

*The global transformation of the conservation equations and the new equation is considerably more simple and convenient for the analysis of processes and programming. The flow processes in various areas of a liquid rocket engine are studied in detail and the conditions for the emergence of key gas dynamics regimes (laminarity, turbulence, nonequilibrium, instability) are determined. An approach to the creation of a new Russian electronic product, which allowed to reliably determine the parameters of the gas flow, taking into account the real properties, is proposed.*

**Ключевые слова:** турбулентность, вычислительная газодинамика, преобразования уравнений сохранения.  
**Keywords:** turbulence, computational gas dynamics, transformations of conservation equations.

Современное состояние вычислительной газовой динамики безусловно зависит от мощности и быстродействия электронно-вычислительных комплексов и его недостаточно для решения многих практических задач. Такие сложные задачи как решение уравнений Навье-Стокса с настоящим электронным оснащением просто невозможны. В работе [1] показано, что даже решение задачи для микроскопического объекта при больших числах Рейнольдса будет продолжаться несколько сотен лет.

Re	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^8$
Условная скорость расчета	68 дней	444 дня	610 лет	$\infty$	$\infty$

Такое положение дел не устраивает исследователей и проектировщиков. Поэтому распространенным является переход на решение упрощенных уравнений движения. Наиболее популярными стали уравнения Эйлера и Рейнольдса. Появилась возможность хоть что-то посчитать. Но это естественно не является выходом из положения. Это только одна из возможностей успокоения. При этом отмеченные уравнения настолько глубоко вросли в наше сознание, что зачастую они принимаются как истинные. Но это глубокое заблуждение. Практически ни одной, а если строго говорить, то ни одной задачи не решается правильно. Отсутствие в уравнениях Эйлера вязкости и сжимаемости исключает полностью решение задач на устойчивость, вязких пристеночных потоков, задач турбулентности и др. Уравнения Рейнольдса сами по себе содержат массу отклонений от истинных условий, но они также предусматривают необходимость использования, по существу, неверных эвристических методов, плохо подкрепленных экспериментами или аксиомами, построены на гипотезах и по сути произвольных методах выбора сценариев процессов.

Тем не менее, практически все электронные продукты, российские и зарубежные, построены на уравнениях Рейнольдса с перерасчетом выше дополнениями и, по-видимому, сейчас мало оптимистов, которые могли бы потягаться с этой империей производителей подобных продуктов. Что же делать? Ответ: нужно на базе глобальных преобразований уравнений сохранения к виду, удобному для программирования, а также на базе глубокого анализа процессов, происходящих в системах, опирающихся на новые экспериментальные данные, разработать свою российскую систему вычислительной газовой динамики, позволяющую проводить в течении реального времени качественные надежные расчеты, со-

ответствующие реальным процессам, происходящим в РД. Создание такого электронного продукта в настоящее время является весьма реальным. Именно сейчас образовалась уникальная ситуация, когда стали понятными основные термодинамические процессы, записаны ведущие уравнения, сформулированы корректные начальные и граничные условия, подкрепленные экспериментом. Ну, а талантливыми программистами Россия всегда славилась. Достаточно назвать таких корифеев как Борис Георгиевич Трусов, Анатолий Петрович Тишин, Анатолий Алексеевич Глазунов и многие другие великие ученые.

### Основания для заявления

Такое заявление может показаться многим легкомысленным и даже нескромным. Но что же делать??? Приходится на это идти! Идти, зная, что на пути понимания заявленного встретятся огромные трудности, появятся многочисленные оппоненты и даже недоброжелатели. Тем не менее, это надо когда-нибудь сделать. А именно, переделать современную вычислительную рейнольдсовскую парадигму. Какие есть для этого основания:

1. Необходимо полностью использовать возможности доказанных пяти теорем турбулентности [2];
2. При анализе использовать имеющиеся экспериментальные достижения по турбулентности [3] и отказаться от необоснованных сценариев наступления детерминированного хаоса;
3. Принять новый подход к прогнозированию устойчивости как частного случая турбулентности [4];
4. Взять за основу новые качественные экспериментальные исследования по двухфазовой газовой динамике и выводы, получен-



Б.Г. Трусов



А.П. Тишин



А.А. Глазунов

ные в результате их анализа [5];

5. Использовать новые результаты исследований неравновесной термогазодинамики [6] применительно к реальным газам.

Теперь о теоремах. Они доказаны на основании глубокого теоретического анализа процессов, происходящих в двигателях летательных аппаратов и в большинстве случаев на примерах двигателей на химическом принципе работы (ЖРД, РДТТ и др.). Доказательства теорем неоднократно публиковались, поэтому в данной работе приводиться не будут. Дадим краткие формулировки этих теорем.

**Теорема 1 (о движении).**

Любое пространственное течение (турбулентное движение) может быть разложено на четыре элементарных движения: поступательное, вращательное, колебательное и торсионное.

$$\vec{a}_{обс} = \vec{a}_n + \vec{a}_b + \vec{a}_k + \vec{a}_t.$$

Последние два движения, колебательное и торсионное, являются циклическими модификациями двух первых. Колебательное - это возвратно-поступательное движение. Торсионное - это возвратно-вращательное движение (крутильные колебания).

**Теорема 2 (о соотношении движений).**

Вторая теорема может рассматриваться как теорема векторного анализа и справедлива для любого вектора. Она утверждает, что скалярное произведение вектора скорости на вектор кручения есть квадрат вектора вращения:

$$\vec{V} \cdot \text{rot} \text{rot} \vec{V} = \text{rot}^2 \vec{V}.$$

**Теорема 3 (об энергиях).**

Теорема об энергиях выводится из уравнения Навье-Стокса без использования упрощений и приближений в строгой постановке и математическими преобразованиями, и представляется как главное уравнение колебательного звена. Для каждой фиксированной точки поля уравнение записывается по типу [7]:

$$\frac{d^2 \bar{p}}{d\tau^2} + 8\pi \text{Ve} \frac{d\bar{p}}{d\tau} + 8\pi \text{Ve} \cdot \text{Me} \cdot P = 8\pi R\mu \frac{\omega}{\omega_0} \frac{d \frac{R\omega}{\omega^2}}{d\tau}.$$

Здесь Ве и Ме - критерии устойчивости.

**Теорема 4.**

Это теорема о возникновении неустойчивости. Неустойчивость возникает тогда, когда будут выполнены необходимые и достаточные условия возникновения автоколебаний.

Необходимое условие:

$$\frac{\text{Me}}{\text{Ve}} > 2\pi \quad \text{или} \quad \Phi Z = \frac{kV^2}{v\alpha^2} \frac{d \frac{V}{\text{rot}^2 v}}{d\tau} > \frac{1}{4}.$$

Достаточное:

$$\omega = \text{const}.$$

**Теорема 5.**

Теорема номер пять утверждает, что турбулентность в сверхзвуковом потоке отсутствует.

**Следствия из теорем о турбулентности**

Доказанные теоремы и новые экспериментальные исследования позволяют глобально преобразовать уравнения сохранения и на основании их анализа понять происходящие внутри ракетных двигателей процессы. По результатам анализа открываются возможности дифференцированно подойти ко всей области исследования полевых функций, характеризующих процесс, выделяя при этом характерные зоны и исключая малозначимые и нефизичные аспекты.

Анализ показывает, что область турбулентности в ЖРД может возникать только в камере сгорания. Все остальное пространство - ламинарное. Причем ламинарное течение всегда реализуется около стенок (ламинарный подслои) и в сверхзвуковом сопле. При отсутствии положительных градиентов давления ламинарность будет везде, кроме, быть может, вблизи форсуночной головки. Таким образом, задача для двигателя в целом может быть поставлена для ламинарных условий. Вместо уравнения Навье-Стокса, как след-

ствии из теоремы 1, может быть записано ламинарное уравнение с двумя граничными условиями - прилипания и сопровождения [8]:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} = -\text{grad}(P + \frac{4}{3} v \frac{d\rho}{d\tau});$$

$$V_{11} = 0;$$

$$\frac{dV_{\text{Осн}}}{dy} = 0.$$

Оба граничных условия характеризуют вязкостные свойства потока.

Такая постановка задачи является корректной, но главное, физически правильной. Само уравнение мало отличается от уравнения Эйлера и вполне может быть запрограммировано с помощью известных методов.

Вторым следствием из теоремы 1 может быть уравнение для турбулентного течения [3]:

$$\text{rot} \vec{V} = \pm \sqrt{M^2(1 - M^2)} \frac{1}{\mu} \vec{V} \text{grad} P.$$

Уравнение было получено с применением теоремы 2. Следствием этого уравнения является математическое доказательство теоремы 5. В работе [3] подробно разбираются случаи, реализуемые при различных условиях. Так, например, показывается, что при дозвуковом режиме отрыв потока возникает при положительном градиенте давления. До сих пор этот факт доказывался чисто экспериментальным путем.

Уравнение для турбулентного случая течения также существенно проще, чем Навье-Стокса. Это уравнение удобно для анализа процессов, но главное то, что его программирование не будет вызывать сложностей, и могут быть использованы также традиционные подходы. Граничные условия по сравнению с ламинарным уравнением не изменятся.

Еще одно следствие вытекает из теоремы 3 и 4. Этим следствием можно считать метод прогноза неустойчивого режима ЖРД. Для того, чтобы получить понятные формулы для расчета, необходимо критерияльные зависимости (необходимое и достаточное условия) совместить с турбулентным уравнением. Не приводя для краткости выкладки, запишем условие возникновения автоколебаний, а значит, неустойчивости. Итак, неустойчивость возникает в случае, если будет выполняться следующее условие:

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} P < \alpha^2 \text{grad} \ln \frac{1}{(1 - M^2)^{2k}}.$$

**Экспериментальные результаты, упрощающие уравнения**

Прежде всего - это результаты по турбулентности. Если проанализировать визуальные картины, полученные с помощью метода уноса массы [3] и фотографии [8], то можно четко сказать, что сверхзвуковые потоки - все ламинарные. Часто за турбулентные струи выдают спутные струи. Эти фотографии или просто визуальные наблюдения являются лишь неправильной интерпретацией стратифицированных потоков. На самом деле струя всегда ламинарная, она, как сказано в известном альбоме Ван-Дайка - бриллиантовая с четко обозначенными гранями, а сама - прозрачная. Это дополнительно экспериментально доказывает возможность для математического описания процесса течения как ламинарного. И тогда для пристенных течений, сверхзвуковых потоков в расчетах газовых полей обоснованным является использование ламинарных уравнений движения.

Еще одним важным экспериментальным результатом, является доказательство того, что в двухфазном сверхзвуковом потоке все процессы коагуляции и дробления прекращаются [5]. Поток становится монодисперсным и использование этого факта дает возможность перейти от сложнейшей задачи по расчету эволюции спектра частиц к траекторной задаче в поле ламинарного сверхзвукового потока.

**Новый подход к решению проблемы вычислительной газовой динамики**

Проведенный анализ состояния вычислительной газовой динамики показал, что основная трудность получения надежных адекватных результатов сталкивается с неразрешимостью современными вычислительными средствами уравнения Навье-Стокса. Кроме того, современная двухфазная газовая динамика загромождена ненужными алгоритмами и страдает от недостатка сведений о реальных физических процессах (области коагуляции, дробления, сепарации). Методы прогноза неустойчивости в современной версии термогазодинамики просто отсутствуют.

В связи с изложенным предлагается новый подход к определению реальных полей течений с использованием новых уравнений газовой динамики, глобально преобразованных с помощью теорем турбулентности и новых экспериментальных результатов. Предлагается также использовать в качестве граничных условий условия прилипания Л. Прандтля на стенке и условия сопровождения на оси. Оба эти условия соответствуют свойствам реального газа и учитывают вязкость и сжимаемость.

Итак, новый электронный продукт для расчета полей параметров потока должен содержать:

1. Программу для расчета ламинарных сверхзвуковых течений.
2. Программу для расчета траекторий частиц ( $dp \sim 5 \text{ мкм}$ ) в ламинарном сверхзвуковом потоке с возможностью осаждения их на стенку и определения плотности тока осаждения.
3. Программу расчета ламинарного подслоя на базе тех же ламинарных уравнений и определения производной  $dV/dn$  на стенке в целях расчета теплообмена.
4. Программу профилирования сверхзвукового сопла с учетом реальных свойств потока (сжимаемость и вязкость). Такой способ профилирования сделает ненужной науку о потерях. Они (потери) уже будут учтены в уравнениях.

5. Программу для определения режимов наступления неустойчивости, которая позволит прогнозировать её наступление в период конструкторской разработки и на стадии экспертизы в период отработки изделия.

6. Программу расчета неравновесного газового поля параметров и доработку расчета термодинамики внутри замороженного ( $w = 0$ ) и равновесного ( $w = \infty$ ) режимов химических реакций.

7. Программу расчета турбулентных течений, определение зон отрыва потока, скачков уплотнения, турбулентно - ламинарных переходов. **П**

**Литература**

1. А.А. Юн. Исследование течений и прочностной анализ // М. изд. Ленанд, 2014 г.
2. Ю.М. Кочетков, Т.Н. Кравчик, О.А. Подымова. Пять теорем турбулентности и их практические приложения. // Вестник машиностроения №7, 2019 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и математическое доказательство ее невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель №3, 2018 г.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Прогноз и экспертиза устойчивой работы ЖРД на стадии проектирования и экспериментальной отработки // Двигатель №1, 2019 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Опыты Куренкова и фундаментальные уравнения двухфазной газовой динамики сверхзвуковых сопел // Двигатель №2, 2015 г.
6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вывод уравнений импульсов из начал термодинамики // Двигатель №3, 2016 г.
7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Постановка и определение акустических параметров задачи о ВЧ-устойчивости // Двигатель №2, 2019 г.
8. Ю.М. Кочетков. Турбулентность сверхзвуковых течений. Памяти Гилевича // Двигатель №2, 2013 г.

Связь с автором: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)

**ИНФОРМАЦИЯ**

**В** ходе ускоренной эксплуатации самолёта F-35 и его двигателя F135 на 2200-м часу наработки (что соответствует девяти годам лётной эксплуатации) произошло разрушение диска турбины. Диск был изготовлен методом впаивания уже готовых лопаток в диск ротора. Для снижения массы диска и, соответственно, двигателя лопатки были изготовлены пустотелыми. Однако при этом не удалось обеспечить усталостную прочность.

Данный диск турбины можно изготавливать путём фрезерования из цельной металлической заготовки, но тогда лопатки пустотелыми изготовить не получается. Если сравнить массу двигателя с дисками, изготовленными по разным технологиям, то разница составляет всего 2,7 кг.

Столь незначительное увеличение массы с лихвой компенсируется упрощением технологии и снижением стоимости производства двигателя. Однако заменить диск, изготовленный по одной технологии, на диск, изготовленный по другой технологии, невозможно без выполнения определённых требований. Во-первых, диск необходимо перепроектировать; во-вторых, выбрать материал, из которого впоследствии будет фрезероваться диск с лопатками (блиск); в-третьих, отработать технологию изготовления; в-четвёртых, провести испытания тестового двигателя. В связи с тем, что разрушение диска в полёте может привести к аварии или катастрофе, данные работы должны быть завершены до конца этого года.



Несмотря на то, что разрушение диска произошло на двигателе F135, установленном на истребителе F-35B с укороченным взлетом и вертикальной посадкой, новый диск будет устанавливаться на двигателях F135 для всех версий истребителя F-35. **П**

**ИНФОРМАЦИЯ**

**П**осле смены владельца вновь возродился проект Bloodhound LSR, которому угрожало банкротство. В марте этого года команда проекта переехала в новый исследовательский центр, в котором инженеры занимаются доработкой сверхзвукового автомобиля и готовят его к установке нового рекорда в 2020 году.

Напомним, что проект Bloodhound LSR стартовал в 2008 г. Цель осталась прежней - преодолеть 1000 миль/ч (1600 км/ч). Нынешний официальный рекорд 1227,985 км/ч. Максимальная скорость, достигнутая Blood-

hound в октябре 2017 г. в аэропорту Корнуолла, составила 337 км/ч.

Инженеры выполнили модернизацию пружин и амортизаторов, установили новые датчики нагрузки и давления воздуха, переделали систему пожаротушения и парашютную систему торможения. Сейчас автомобиль находится на высушенном озере Хаксен-Пан (Южная Африка), на котором испытатели надеются разогнать машину до 800 км/ч. Уже выполнено два заезда. Во вто-

ром была достигнута скорость 537 км/ч. Разгон с 80 до 537 км/ч занял 20 с. **П**

