УДК 532.2

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ. СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ИЛИ «КАРТИНА РЕПИНА "ПРИПЛЫЛИ"»

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Традиционная двигательная наука не учитывает основные физические особенности процессов в РД и требует пересмотра. Предложены новые подходы к решению основных задач газовой динамики, профилирования и неустойчивости.

Conventional science of engines does not take into consideration main physical processes in RE and requires revision. New approaches to solving principal issues of gas dynamics, contouring and instability were proposed.

Ключевые слова: *турбулентность.*

Keywords: *turbulence.*

Настоящая работа вызвана сложившимся катастрофическим положением в ракетной науке, а точнее в науке о процессах в ракетных двигателях.

Практически все основные её теории, строго говоря, неправильные. Но аргументом в их пользу всегда выставляются спекулятивные заявления о том, что ракеты же ведь летают. Да, летают. Но чего стоит их заставить летать! Делая их первоначально по отработанному прототипу практически подобными, в дальнейшем их мучительно отрабатывают на стендах. При этом теоретические прогнозы, как правило, не совпадают с практикой и они (прогнозы) набирают силу только по мере накопления эмпирических данных. Очень много талантливых ученых внесли свою лепту в построение этой сложной науки. Многочисленные экспериментальные исследования и теоретические разработки наполняют в настоящее время содержанием тысячи книг по газовой динамике, теплообмену, профилированию сопел, двухфазности, НЧ и ВЧ неустойчивости. Тем не менее, то ли в силу недостаточности расчетных ресурсов (на ранней стадии), то ли в силу недостаточности фактического материала, теоретический аспект очень сильно отстал от реальности. Повальная "традиционность" в подходах, желание упрощения, лишь бы получить хоть какой-нибудь результат, а зачастую административный аспект, привели современную двигательную науку в состояние практической беспомощности. Поистине - «картина Репина "Приплыли"». Это фольклор. На самом деле автор этой картины - Соловьев Л.Г., и сюжет её очень прост. Несколько монахов в поисках пу́стыни приплывают вместо этого на солнечный пляж, где моются и купаются с маленькими детьми голые русские деревенские женщины . Удивлению и разочарованию монахов нет предела. Аналогия с этой великолепной картиной прямая: в поисках истины, так уж исторически сложилось на сегодняшний день, двигательная наука оказалась не способной правильно прогнозировать процессы, так как в её основе заложены грубейшие ошибки, не позволяющие математически правильно поставить задачу. Говоря о двигательной науке, автор подразумевает пять её основных дисциплин:

1. Газовая динамика (в основном ЖРД);
2. Акустика и НЧ-ВЧ колебания;
3. Двухфазная газовая динамика (в основном для РДТТ);
4. Профилирование сверхзвуковых сопел;
5. Пристеночное течение и теплообмен.

В последующих разделах будет объяснено такое резкое заявление. И ещё. Было бы неприличным просто так, огульно, делать заявление о том, что всё якобы неправильно. Поэтому автором предлагаются новые решения, исправляющие или частично исправляющие сделанные ошибки. И здесь нет ничего оскорбительного. Это - просто острая дискуссия.

Почему уравнения Рейнольдса являются неправильными

Любому газодинамику, тем более человеку, исследующему в этой науке её раздел «Турбулентность», приходилось встречаться

Картина Л.Г. Соловьева "Монахи. (Не туда заехали)" с уравнениями движения, определяющими поле скоростей. Их всего три:

1. Уравнения Эйлера.
2. Уравнения Навье-Стокса.
3. Уравнения Рейнольдса.

Хотя по хронологии уравнения Рейнольдса стоят в конце, правильно начать с них, чтобы потом к ним не возвращаться.

Записывать эти уравнения для нашего анализа не имеет смысла, так как они изложены практически в любой книге по газовой динамике, например [1].

Представляют они из себя "распульсированные" уравнения Навье-Стокса. То есть Рейнольдс, основываясь на своих классических экспериментах на трубе, где показан переход к турбулентному течению, умозрительно "выделил" из потока пульсационную составляющую. Эту составляющую, не определяя её физический смысл, он наделил свойством случайности. При этом в его интерпретации турбулентность приобретает случайный смысл. То есть всё, что по руслу - не случайно (надо понимать, что ламинарно), а что "прыгает" и "дергается" относительно потока вдоль русла - случайно, а значит мгновенно. Обе составляющие - случайную и неслучайную - он объединил, и получилось новое течение. При этом сделал он это путем аддитивных операций. Переменные в уравнениях Навье-Стокса Рейнольдс представил в виде сумм средней и пульсационной составляющей. При этом была сделана первая грубейшая ошибка. Соглашаясь с такой операцией для скаляров: плотности, давления и температуры, к сожалению нельзя согласиться с этой операцией для скоростей. Это же вектор, а значит, и складывать его надо по правилу параллелограмма. Причем даже если складывать проекции, то надо представлять их взаимосвязь. Рейнольдс этого не сделал. Трудно говорить к чему это приводит в каждом конкретном случае. Может к ошибке в 100 %, а может обойдётся вообще без ошибок. Но! Главное то, что принципиальная ошибка уже сделана.

Теперь обратимся к преобразованиям. В той же книге [1] изложение приема Рейнольдса записано на девяти страницах. При этом периодически (через каждые 3-10 строчек) встречаются слова:

- можно положить;
- будем предполагать;
- подразумевается, что будет справедливым;
- приходится вводить;
- можно получить (а как?);
- обратимся к составлению уравнений;
- произведем замену (на каком основании?);
- предположение эквивалентно утверждению о равенстве нулю средних значений пульсаций и т.д.

Такой фейерверк предположений и допущений позволяет получить все, что угодно. Ну да ладно. Но когда вводится понятие *рейнольдсова напряжения*, приходится напряженно думать, что это такое? Ведь оно составлено из случайных пульсаций. Оно существует, если оно есть, и мгновенно пропадает. Даже это не так сильно. Дальше, например, предполагается по аналогии с методами реологии представлять эти напряжения как тензор. И совсем никуда не годится, когда этот тензор нарекают линейным относительно деформаций. Понятно, что это только прием. Но к чему он приведет, знает только великий Осборн.

Далее Рейнольдс вводит свои правила осреднения пульсаций. Откуда он их взял и что делать законопослушному гражданину? Ведь практически ни одно из правил не выводится с помощью математических или статистических законов.

И ещё! Уравнений у Рейнольдса появилось в два раза больше. Вместо трех как у Навье-Стокса - шесть. Чтобы их замкнуть, последователи придумали модели турбулентности. Достаточно сказать, что эти модели почти все "холодные" и "плосковоздушные", так как получены в основном на пластинах с помощью термоанемометров. А как результаты плоских экспериментов переносить на криволинейные стенки, ведь турбулентность предполагает наличие градиентов и шероховатостей?

Более того, моделей турбулентности существует в настоящее время огромное количество. Так, например, в [2] их представлено шестнадцать. Причем эти модели простираются от алгебраических до дифференциальных. В одной из организаций была выбрана наиболее совпадающая с экспериментами модель, которая была принята как основная для дальнейших расчетов. Но именно эта модель оказалась самой плохой при расчете другого варианта подобной конструкции. Что же делать? Какую модель брать?

Очевидно, что эти уравнения непригодны для расчета газодинамических течений в ракетных двигателях. Тем более, что первичные уравнения Навье-Стокса, из которых были выделены уравнения Рейнольдса, правильно описывают турбулентный процесс. По-видимому, исследователей пугает лапласиан и градиент дивергенции, а в уравнениях Рейнольдса все это хитрым образом утрачено. Так может быть все-таки ещё раз проанализировать уравнения Навье-Стокса? Может быть и удастся их преобразовать к более простому виду?

Методологическое значение уравнений Эйлера

Идея изучения движения сплошной среды через дифференциальные уравнения в частных производных относительно полевых величин плотности потока и скорости в переменных пространства и времени принадлежит великому русскому ученому Леонарду Эйлеру. При этом скорость $V = V(x, \tau)$ определяется как

$$\vec{V} = \frac{dx}{d\tau} \equiv \frac{\partial\phi(X, \tau)}{\partial\tau},$$

где dx - дифференциал смещения $\frac{\partial\varphi(X, \tau)}{\partial\tau}d\tau$ некоторой точки X из координаты x в координату $x' = x + dx$.

Ускорение есть скорость изменения $\vec{V}(X, \tau)$ для движущейся точки, то есть

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\vec{V}(X, \tau) = \frac{d}{d\tau}\vec{V}(x, \tau).$$

При этом субстанциональная (материальная) производная от скорости есть вектор

$$\frac{d}{d\tau}\vec{V}(x, \tau) = \frac{\partial}{\partial\tau}\vec{V}(x, \tau) + \vec{V}\,\mathrm{grad}\vec{V}.$$

Эйлером было получено уравнение движения для так называемой "идеальной" жидкости, в котором был применен закон Паскаля. При этом была введена полевая переменная - давление, скалярная функция точки:

$$\rho\frac{d\vec{V}}{d\tau} = -\mathrm{grad}P.$$

Такое, как принято называть, "идеальное" уравнение отличается от реального уравнения Навье-Стокса тем, что в нем отсутствует вязкость и сжимаемость среды. Кстати, на сжимаемость стали обращать внимание позже. Все воспринимали это уравнение как уравнение без вязкого трения. Считалось, что основные закономерности течений могут быть полностью описаны именно этим уравнением, а некоторые недочеты могут быть устранены либо поправками, либо специальным учетом путем введения у стенки вязкого пограничного слоя. На практике все оказалось гораздо сложнее. Более простое по сравнению с уравнением Навье-Стокса уравнение Эйлера обладало одним принципиальным пороком. С помощью этого уравнения нельзя было правильно поставить задачу. Уравнение не позволяло в силу своей структуры правильно поставить граничные условия. Эти условия выродились в условия непротекания вместо условий прилипания к стенке. Исследователи успокаивались тем, что эмпирическая теория пограничного слоя решит все проблемы, а теория потерь удельного импульса тяги, также умозрительно-эмпирическая, разрешит так же проблемы сжимаемости.

Но! Методологически уравнение Эйлера весьма важно. На его базе было разработано феноменологическое уравнение Навье-Стокса и если делать ссылку на [3], оно (уравнение Навье-

Стокса) в совокупности с условиями прилипания является фундаментальным законом природы. Уравнение Эйлера было предтечей уравнения Навье-Стокса. Можно сказать, что оно было первым промежуточным звеном в цепочке сложнейших исследований в целях разработки последнего.

Само уравнение Эйлера для конкретных задач применять нельзя, поскольку в дозвуковом потоке (М ~ 0) для исследования полей скоростей его применять нецелесообразно, в узкой дозвуковой области у критики, где Re ~ 10^6 не всегда корректно, а для решения основной задачи неустойчивости оно непригодно по причине отсутствия сжимаемости. Для расчета сверхзвуковых потоков оно также непригодно из-за отсутствия сжимаемости как основополагающего свойства сверхзвуковых течений. Следует отметить, что утверждение о том, что в сверхзвуковой части сопла число Рейнольдса возрастает (оно напротив резко падает практически до нуля) и можно пренебречь вязкостью, является ошибочным. Вязкость непременно нужно учитывать. В противном случае из-за неправильных граничных условий будут получаться ошибочные результаты.

Тем не менее, в настоящее время, к сожалению, уравнение Эйлера используется как основное в газовой динамике. Обидно, что до сих пор появляются книги, в которых даже не упоминается слово вязкость, а сжимаемость "подтверждают", вводя уравнение состояния.

Ошибочные методы в традиционной науке о турбулентности

Традиционная наука о турбулентности предусматривает два подхода: один, основанный на решении задачи Навье-Стокса и второй, направленный на решении задачи Рейнольдса. Но, как уже было показано выше, второй подход неправильный.

Решение турбулентных течений с помощью нелинейных уравнений Навье-Стокса в настоящее время практически не используется в силу их сложности. Поэтому задачи решаются путем комбинации решений уравнений Эйлера и дополнительных уравнений и приемов, как-то учитывающих вязкость и сжимаемость.

Газодинамические задачи

К газодинамическим задачам относятся задачи определения полей скоростей и, если это требуется, полей плотностей, давлений и температур. Решения газодинамических задач методом Эйлера, что в настоящее время в газовой динамике наиболее распространено, натыкается на проблему постановки граничных условий. И даже если считать, что дозвуковой поток в своем ядре мало от них зависит, то встает другая проблема: из-за отсутствия вязкости возможно рассчитать только ламинарное течение. В крайнем случае можно рассчитать крупномасштабные вихревые течения. О сверхзвуковом потоке, в силу изложенного выше, говорить не приходится. С какой же ошибкой можно рассчитать поле течения, если все-таки не использовать уравнение Навье-Стокса? Очевидно, что эта ошибка при расчете ускорений газового потока будет измеряться величиной

$$\vec{R} = \upsilon \Delta \vec{V} + \frac{\upsilon}{3}\,\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\vec{V}.$$

Сколько это? Много это или мало предоставляется оценить читателю. Думается, что этого окажется много, если ещё учесть неправильно поставленные граничные условия. Но! Если воспользоваться [4], то для сверхзвукового и ламинарного течения в камере сгорания у стенки задача сильно упрощается. Более того, она становится корректной.

Задача о неустойчивости

В литературе сказано, что акустика (неустойчивость) это - газодинамика малых амплитуд. В связи с чем, для получения уравнений по неустойчивости традиционно используют первоначально уравнения движения. Берут уравнение Навье-Стокса и пытаются выделить из него колебательные решения. Но оно плохо поддается такой операции. Тогда отбрасывают от него члены с вязкостью и сжимаемостью, дескать, в дальнейшем учтем эту погрешность. Но и получившееся уравнение Эйлера также сопротивляется разрешению. Мешают нелинейные члены. Тогда, успокаивая себя тем, что амплитуды решений будут, видимо, малыми, уравнение Эйлера линеаризуют. Далее, после ещё одного известного преобразования [1], получают волновое уравнение. Тут уж приходит уверенность. Во-первых, волновое уравнение по весовой категории соизмеримо с уравнением Навье-Стокса, являясь так же классическим уравнением математической физики, а во-вторых, укрепляется уверенность в нахождении колебательных режимов. Волновое уравнение решают либо методом разделения переменных Фурье, либо путем его преобразования в уравнение Гельмгольца. После разделения переменных получают уравнение Неймана, которое решать не умеют и уравнение Бесселя, у которого, как известно, в решениях содержится плавающая частота. Но! Если взять первые члены из трех уравнений Бесселя, то появляется синус. Вот и считают, что он и описывает колебания. При подходе Гельмгольца сразу предполагается, что решением должна быть колебательная функция. Она напрямую просто туда закладывается и получается трехмерное уравнение Гельмгольца. Но опять неизвестно как его решать. Тогда договариваются рассматривать как предварительный одномерный случай. И, о Боже, получается уравнение линейного осциллятора. Но вот незадача, в этом уравнении отсутствует член с первой производной. Тогда в силу "логики" его просто туда добавляют, из общих соображений. Вот и получается главное уравнение колебательного звена. Теперь остается дело за малым: понять, откуда взять коэффициенты. Ну, а их берут из эксперимента. Вот и все. Наука закончилась. Предсказывать что-либо она прекратила уже на стадии перехода к уравнению Эйлера. Но остается мощный аппарат эксперимента. Все очень просто: делаешь по прототипу аналог перспективного двигателя и далее мучительно долго экспериментальным путем проб и ошибок отыскиваешь конструкцию, которую не трясет. Но теоретически решение все-таки можно найти. Так, например, как это сделано в [5]. А что? Может быть, попробовать пойти по этому пути? Или все-таки оставаться на традиционных позициях?

Задачи о профилировании сверхзвукового сопла

Профилирование в настоящее время осуществляется двумя основными способами: с помощью метода характеристик, основанном на уравнении Эйлера, и методом примитивного перебора различных геометрических кривых, дающих максимальное значение удельного импульса тяги. При этом спрофилированному, уже теперь "идеальному" соплу, вольно присваивается весь удельный импульс тяги, который получается из термодинамического расчета. Далее начинается работа с потерями: газодинамическими, химическими и др. Понятно, что определение зависимостей для потерь - это специальная задача - задача нахождения неких, в основном, эмпирических формул. Часто потери определяются из общих соображений, где замешиваются эмпирические и балансовые соотношения. В итоге получается, что эти потери достаточно велики ~10...12 %. Это как раз и есть точность расчетов методом Эйлера. В работе [4] изложен новый способ профилирования сверхзвуковых сопел, основанный на решении преобразованных уравнений Навье-Стокса.

Задачи о двухфазных течениях

Поскольку все известные расчетные методы двухфазных течений основаны на использовании уравнений Эйлера, то следует также отметить, что, к сожалению, они неправильные. Частица, летящая в газовом поле, рассчитанном при неправильной постановке задачи, будет иметь траекторию, отличную от реальной. Более того, в одной из работ автора [6] было показано, что в сверхзвуковом газовом потоке частицы практически монодисперсные. После перехода через звук коагуляция и дробление прекращаются. Размер частиц становится соответствующим критическому числу Вебера. Постоянство размера в сверхзвуке было обоснованно экспериментально совместно с А.В. Куренковым и

Р.Р. Акоповым при одновременных отборах частиц из камеры сгорания и сопла.

Задачи пограничного слоя и тепловые задачи

На сегодняшний день теория пограничного слоя в сверхзвуковых соплах отсутствует, равно как отсутствует и доказательная база турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковых соплах [7]. Исследование дозвуковых законов трения, полученных Прандтлем и его учениками, неправомочно. Турбулентные законы трения, полученные на пластинках, неприменимы для сопел. В связи с этим тепловые задачи, которые решаются с применением методов турбулентного пограничного слоя, решаются неправильно. В работе [8] предложены точные уравнения для пристеночных областей камеры сгорания и сопла, полученные с помощью преобразований координат в уравнениях Навье-Стокса. Эти новые уравнения пограничного слоя не страдают такой особенностью как нахождение толщины пограничного слоя с целью дальнейшей сшивки решений уравнений Эйлера и эмпирических соотношений для пластин. Новые уравнения позволяют просчитать непрерывное газовое поле по всему объему сопла и специально выделить высокоградиентную зону у стенки.

Литература

1. Л.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа // Дрофа, М. 2005 г.

2. И.Б. Белов, Н.А. Кудрявцев. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб // Энергоатомиздат, Л. 1987 г.

3. М.А. Гольштик, В.Н. Штерн, Н.И. Яворский. Вязкие течения с парадоксальными свойствами // Наука, Новосибирск, 1989 г.

4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Фундаментальные уравнения сверхзвуковой газовой динамики и новый метод профилирования сопел ЖРД. // Двигатель № 3, 2013 г.

5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и автоколебательный процесс. // Двигатель № 3, 2012 г.

6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Опыты Куренкова и фундаментальные уравнения двухфазной газовой динамики сверхзвуковых сопел. // Двигатель № 2, 2015 г.

7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность в пограничном слое. // Двигатель № 6, 2013 г.

8. Ю.М. Кочетков. Турбулентность на шероховатых стенках и новые фундаментальные уравнения пограничного слоя. // Двигатель № 3, 2015 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com