

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

На практических примерах показано, что критические значения параметров играют важную и определяющую роль при исследовании физических процессов в ракетных двигателях. Они разделяют области с качественно отличающимися процессами. Показана невозможность возникновения за критикой турбулентных течений, неустойчивости и полидисперсности. Результаты анализа течений и эволюции частиц в двухфазных потоках за критической областью позволяют существенно упростить прогнозные расчеты важных термо-газодинамических параметров.
On practical examples it is shown that the critical values of the parameters play an important and decisive role in the study of physical processes in rocket engines. They share areas with qualitatively different processes. The impossibility of occurrence of turbulent flows, instability and polydispersity behind the criticism is shown. The results of the analysis of the flows and evolution of particles in two-phase flows beyond the critical region make it possible to significantly simplify the predictive calculations of important thermo-gasdynamic parameters.

Ключевые слова: турбулентность, теплоемкость, энтропия.

Keywords: critical parameters, nozzle, turbulence, instability, polydispersity.

Многие параметры процессов в ракетных двигателях ограничены так называемыми критическими значениями. Это не является случайным, так как за этим кроется глубокий физический смысл. Физики часто употребляют этот термин - критический: критическое сечение, критическое значение, критические условия.

Видимо, это те предельные условия, при которых заканчивается определенное качество, например: поток переходит из дозвукового состояния в сверхзвуковое, или ламинарность переходит в турбулентность, или жидкая фаза превращается в газообразную и т.д.

Очень часто критическое состояние характеризуют некоторым критерием с критическим значением, например, критическое число Рейнольдса и пр.

В чем же уникальность, исключительность, качественная несомизмеримость, а главное, важность этого понятия: критическое состояние? В том, что это состояние определяет переход от одного качества к другому, часто с принципиально различными свойствами.

Многие процессы приходят при достижении критических параметров к своим предельным значениям. Многие претерпевают качественный скачок. А многие достигают состояния инверсии. В ракетной технике знать критические значения необходимо и важно по трем причинам.

Во-первых, необходимо знать границы, при которых происходит переход к новому качеству.

Во-вторых, как правило, в критических точках, сечениях и т.д. значения параметров принимают экстремальные величины.

И, в-третьих, критические значения являются реперными точками процесса.

Далее рассмотрим несколько ситуаций, в которых критические параметры играют основополагающую, определяющую роль как в научном плане, так и в плане прикладном, инженерном. Они дают возможность новым исследованиям естественных и технических процессов.

Сверхзвуковой переход

Одним из потрясающих открытий является открытие звукового режима течения, такого режима, когда вынужденная скорость газового потока благодаря градиенту давления равна скорости теплового движения молекул, то есть скорости звука $M = 1$. Этот переход обозначил области полей скоростей, когда $M < 1$ и области $M > 1$. То есть дозвуковую и сверхзвуковую. Это открытие было тесно связано с изобретением сопла Лавалля, позволившим получать сверхзвуковые потоки. Переход через

звук качественно повлиял на процессы в этих областях.

1. В дозвуковой области поток "чувствует" преграду. Есть так называемая обратная связь. По линиям тока можно воспроизвести всю картину течения вплоть до начала течения.

2. Сверхзвуковой поток не чувствует преграды. Он на нее натывается.

3. Возникает качественно новое феноменологическое явление - скачок уплотнения. Точнее - ударная волна.

4. Следствием из второго свойства является невозможность существования вихревых и торсионных структур. Они неустойчивы к встречным потокам.

5. В самой ударной волне также возможен дозвуковой переход. Внутри волны он происходит, преодолевая критическое состояние [1].

В ракетной технике критическое состояние рабочего тела ассоциируется именно с критическим сечением сопла, то есть с самым узким местом, где поток течет сначала с геометрическим сужением, а затем с геометрическим расширением. Эта ситуация формально математически отражается в скалярном уравнении Гюгоню:

$$(1 - M^2) \frac{dv}{v} = - \frac{dF}{F},$$

где показано, что в дозвуковой части поток разгоняется при сужении канала, а в сверхзвуковой он, почему-то, разгоняется при расширении канала. Подобная инверсия знака при dF непонятна. Ведь все параметры P, ρ, T, \vec{v} ведут себя монотонно, а вот площадь проходного сечения почему-то имеет минимум. И этот минимум находится именно в области критических параметров. Скорее всего, это происходит из-за того, что скорость течения в этом месте выравнивается с тепловой скоростью.

Ведь скорость звука по длине двигателя падает, а скорость



Иван Федорович Шебеко



Карл Густав Патрик де Лаваль



Осборн Рейнольдс

потока растет. Но почему именно в критике? Это загадка.

Открытие сверхзвуковых потоков стимулировало не только научные работы, но и положило начало каскаду важных изобретений. Так, например, для исследований таких сопел (сопел Лаваля) в высотных условиях была изобретена труба Шебеко, которая простыми инженерными способами моделировала течение с большими скоростями на выходе из сопла.

Переход к турбулентному течению

Известно, что при критическом числе, установленном экспериментально Рейнольдсом, ламинарный поток переходит в турбулентный. В трубе это $Re_{кр} \cong 2400$. Но, строго говоря, эта граница весьма условна. Что считать турбулентностью? Если это некая условная ситуация, когда поток перемешался, то нужно сказать, до какой степени. Ведь визуальная оценка является весьма субъективной и не определяет строго понятия турбулентность. Если под турбулентностью понимать потоки, в которых присутствуют вихри, то тогда этот критерий неточен. Они (вихри) появляются дальше [2], и тогда необходимо учитывать все факторы, влияющие на их образование [3]:

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

В соответствии с последней формулой, а это пятая теорема турбулентности, следует, что турбулентность может существовать либо в ядре камеры сгорания, либо в скачках уплотнения в сверхзвуковом сопле. Вдоль стенок и на всем протяжении сверхзвукового потока будет всегда реализовываться только ламинарный режим.

Где самое большое число Рейнольдса?

Этот вопрос интересует всех газодинамиков, и в большинстве случаев ответ, как правило, один. Чем дальше от форсуночной головки в ЖРД и чем ближе к срезу сопла, тем больше число Рейнольдса. Ведь, как говорят, скорость к срезу сопла растет, диаметр к срезу сопла в сверхзвуке растет, и обратная величина вязкости к срезу сопла тоже растет. Все растет - значит, число Рейнольдса растет. А ρ (плотность)? Ну, плотность примерно равна "шестерке" и, по всей вероятности, мало повлияет на величину искомого критерия!!!

Покажем еще раз [4], что это не так. Плотность перетягивает все остальные параметры.

Запишем и преобразуем число Рейнольдса:

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

где G - массовый расход.

Отнесем преобразованный критерий Рейнольдса к его критическому значению, при этом учтем, что $G = const$:

$$\frac{Re}{Re_{кр}} = \frac{1}{\bar{r} \cdot \bar{\mu}}$$

Здесь $\bar{r} = r/r_{кр}$ - безразмерная ордината; $\bar{\mu} = \mu/\mu_{кр}$ - безразмерная вязкость, отнесенная к ее значению в критическом сечении.

Многочисленными термодинамическими расчетами показано, что $\bar{\mu} \cong 1$, тогда

$$\frac{Re}{Re_{кр}} = \frac{1}{\bar{r}}$$

Это означает, что сам критерий Рейнольдса ведет себя обратно пропорционально изменению ординаты контура сопла. Там, где ордината больше, он (критерий) меньше и наоборот. Тогда становится понятным, как будет вести себя этот критерий в дозвуковой области и в сверхзвуковой. В дозвуковой он растет, а в сверхзвуковой падает. А вот в критическом сечении этот критерий

примет максимальное значение. Таким образом, самое большое число Рейнольдса будет при критических значениях газового потока. Самая бурлящая турбулентность будет в критике. А вот в сверхзвуке все приходит к ламинарности. И это еще одно доказательство ранее высказанного утверждения о невозможности существования турбулентности в сверхзвуковом потоке.

О ВЧ-неустойчивости в сверхзвуке

Как было показано в предыдущих работах, например в [5], неустойчивость, или просто колебания в среде продуктов сгорания, может возникать только в турбулентных потоках и только при условии, когда выполняется неравенство:

$$\frac{\kappa M^2}{v} \vec{v} \cdot \frac{d\left(\frac{\vec{v}}{rot^2 \vec{v}}\right)}{d\tau} > \frac{1}{4},$$

что также соответствует экспериментальному критерию Релея о возможности начала колебательных процессов.

Величина $rot^2 \vec{v}$ показывает необходимость присутствия в потоке турбулентных движений. Эти рассуждения однозначно приводят к выводу о том, что в сверхзвуковом потоке колебания возникать никогда не будут. Этот вывод является фундаментальным и имеет большое значение в практической деятельности, в том числе при создании всевозможных энергетических и двигательных установок. Последние выводы существенно упрощают анализ ВЧ-устойчивости, локализуя его в область камеры сгорания. Но помня о том, что в правильно сконструированной камере значение градиента давления $grad p$ всегда имеет отрицательную величину, а само значение по длине камеры монотонно уменьшается, то поток должен быть всегда ламинарным. Турбулентность в ЖРД возникнет только в области смесительной форсуночной головки, где возможны положительные градиенты давления. Вот почему решение проблемы неустойчивости часто ищут в этой области. И мероприятия по удалению ВЧ организуют именно в этой области (антипульсационные перегородки, крест Исаева и др.).

О частицах в двухфазном потоке

Первоначально проблема влияния частиц к-фазы на параметр РДТТ ставилась весьма глобально. Это было сделано все от того, что плохо была изучена экспериментально динамика спектра частиц, то есть его эволюция вдоль камеры сгорания и сопла. Работы пермских, новосибирских, московских, бийских, киевских, а также зарубежных ученых, были сосредоточены на создании огромных (монстроидальных), всеобъемлющих программ, которые учитывали все на свете. И коагуляцию, и дробление, и обратное влияние частиц на газ, и вращение частиц и "центральность удара снаряда по мишени". Автор уже перечислял фамилии авторов этих работ в своих статьях. Очень им благодарен и думает, что не обидит их неупоминанием. Эти программы считали варианты недеялами и все ради того, чтобы, в конечном счете, решить две важные инженерные задачи: понять, сколько попадает частиц на концевую часть сопла (оценить разрушение стенки) и сколько секунд импульса теряется на двухфазное отставание.

Важно, что расчеты проводились по всей длине двигателя: и по камере, и по соплу. Вал расчетов пришелся на период активного создания наших советских баллистических ракет, то есть в доперестроенный период. После чего был период затишья. Создалась ситуация, когда можно было многое осмыслить, обдумать и непредвзято посмотреть на полученные результаты. Объективный анализ многих экспериментальных результатов того периода позволил установить и более четко представить некоторые закономерности. Так, например, анализ совместных экспериментальных работ автора с Анатолием Васильевичем Куренковым [6] показал, что все процессы преобразования функций распределения частиц, то есть та самая упомянутая выше эволюция, заканчивается в критическом сечении сопла. В сверхзвуковой части сопла, когда уже прошли процессы коагуляции и дробления частиц к-фазы, спектр частиц преобразовался в моноспектр. Все частицы на протяжении всей

длины сопла были (по результатам экспериментов) одного размера. Было установлено, что для штатных топлив, применяемых в РДТТ, в продуктах сгорания условно были частицы одного единственного размера, равного ~5 мкм.

Это сразу колоссально облегчает задачу расчетов двухфазных течений. Задача сводится к траекторной в сверхзвуковом ламинарном потоке. Понятно, что частицы одного размера в ламинарном потоке будут лететь каждая по своей траектории без пересечения с соседней. Осаждаясь на стенку в концевой части сопла они будут формировать весьма предсказуемый профиль плотности тока осаждения и тогда не составит труда оценить по плотности токов осаждения \dot{m}_p плотности тока уносов:

$$\dot{m}_w = \kappa_\Sigma \dot{m}_p.$$

Здесь коэффициент κ_Σ весьма консервативен и равен ~0,23 [7].

Расчет потерь удельного импульса тяги на двухфазность также не будет представлять трудностей. Количественно алгоритм этого расчета для спектра частиц одного размера изложен в работе Е.Л. Стернина [8].

Итак, во всех приведенных примерах было получено влияние на процессы условий в потоке, которые характеризуют область критического сечения. Еще раз стало понятно, что эта область

очень важна для прогнозирования процессов в двигательных и энергетических установках. ▶

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и математическое доказательство ее невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель №3, 2018.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вихри Тейлора-Гертлера // Двигатель №3, 2014.
3. Ю.М. Кочетков. Устойчивость пристенных течений в соплах РДТТ // Двигатель №6, 2002.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность сверхзвуковых течений. Памяти Гилевича // Двигатель №2, 2013.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Синхронизация автоколебаний в ЖРД // Двигатель №6, 2012.
6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Опыты Куренкова и фундаментальные уравнения двухфазной газовой динамики сверхзвуковых сопел // Двигатель №2, 2015.
7. Ю.М. Кочетков. Влияние величины входного угла сверхзвукового контура на разгар сопла РДТТ // Двигатель №6, 2003.
8. Л.Е. Стернин. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.Машиностроение, 1974.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ

На страницах журнала "Двигатель" неоднократно публиковались материалы об использовании эффекта Буфольда-Брауна для создания силы, способной поднять и удерживать летательный аппарат в воздухе. В этом номере мы даём репринт (стр. 22-23) статьи, опубликованной в 4 номере журнала за 2009 г. Исследования, о которых тогда шла речь, были проведены ребятами из школы "Интеллектуал". О таких же исследованиях мы рассказали и в прошлом номере журнала ("Двигатель" №5 - 2018, стр. 14). И вот пришло сообщение о том, что группе исследователей и инженеров из Массачусетского технологического института удалось создать и испытать в воздухе летательный аппарат, который не использует ни одной движущейся детали для создания подъемной силы. Этот аппарат массой 2,3 кг и имеющий размах крыльев около 5 м, весьма похож на модель планера, у которой под крылом установлена необычная конструкция. Вот эта конструкция и является атмосферным ионным двигателем, создающим бесшумный поток ионизированного воздуха, благодаря которому летательный аппарат совершает полёт. Пока дистанция полёта составляет 60 метров. И это ограничение наложено не возможностями ионного двигателя или источника энергии, такую длину имеет помещение спортивного центра, внутри которого производились испытания.

Принцип, который использовали в ионном двигателе специалисты Массачусетского технологического института, называется электроаэродинамикой и он был открыт в 1920-х годах известным летчиком и конструктором Александром Северским (Major Alexander de Seversky). Идея заключается в создании сетки из тонких проводов или полосок фольги, одна из сеток выполняет роль положительного, а вторая - отрицательного электрода. Электрический потен-

циал на этих электродах вырывает электроны от молекул воздуха. Положительно заряженные ионы воздуха начинают перемещаться в сторону отрицательного электрода. При этом движении происходят столкновения ионов с нейтральными молекулами воздуха и, увлекая их с собой, порождают поток воздуха, который способен создавать хоть и небольшую силу тяги, но которую, тем не менее, уже можно измерить.

Проблема электроаэродинамики заключается в том, что созданные на ее основе устройства имели до последнего времени большие размеры, которые исключали возможности их практического применения. Из-за этого круг таких устройств был мал и ограничивался, в основном, ионными воздухоочистительными системами.

Прорыв в деле создания атмосферного ионного двигателя стал возможным благодаря работе профессора Стивена Барретта (Steven Barrett), который посвятил этому направлению около 9 лет. Результатом этой работы стал достаточно высокоэффективный ионный двигатель, состоящий из проводников различной толщины, что делает его похожим на какую-то экзотическую радиоантенну. Эти проводники действуют как отдельные электроды, а чередование положительных и отрицательных электродов в особой последовательности и позволило увеличить эффективность двигателя в целом.

Источником энергии ионного двигателя является небольшая литий-полимерная аккумуляторная батарея, расположенная в "фюзеляже" летательного аппарата. А специализированная высоковольтная электронная система, разработанная и созданная специалистами группы Power Electro-



nic Research Group, позволяет получить электрический потенциал в 40 тысяч вольт, который и подается на электроды ионного двигателя.

Как можно убедиться, конструкция атмосферного ионного двигателя весьма примитивна, но этот двигатель позволяет летательному аппарату действительно лететь, а не планировать, постоянно скользя вниз по потокам воздуха.

"Так как атмосферный ионный двигатель работает исключительно на электричестве и не нуждается в топливе, он может быть использован для обеспечения полета стратосферных летательных аппаратов, поднимающихся практически к границе с космосом", рассказывает профессор Барретт, - "Кроме этого, такой двигатель может стать источником дополнительной тяги для летательных аппаратов, использующих более традиционные технологии".

Исследователи признают, что практические летательные аппараты, использующие подобные ионные двигатели, появятся еще не очень скоро. Тем не менее, эффективность и экологическая чистота такого двигателя заставляют ученых продолжать работы в данном направлении. И в ближайшем будущем исследователи планируют увеличить эффективность при помощи технологий увеличения площади электродов, которые не требуют значительного увеличения размеров и массы двигателя. ▶