

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

О П Ы Т Ы К У Р Е Н К О В А И Ф У Н Д А М Е Н Т А Л Ь Н Ы Е У Р А В Н Е Н И Я Д В У Х Ф А З Н О Й Г А З О В О Й Д И Н А М И К И С В Е Р Х З В У К О В Ы Х С О П Е Л

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Установлен факт насыщения кривой распределения частиц вдоль оси сверхзвукового сопла и показано, что двухфазный сверхзвуковой поток является монодисперсным. Разработаны фундаментальные уравнения для расчета двухфазного потока в сверхзвуковом сопле.

The fact of saturation for curve of particle distribution along supersonic nozzle is detected. It is shown, that two-phase supersonic flow is monodisperse. The fundamental equations for calculation of supersonic two-phase flow are developed.

Ключевые слова: турбулентность, вихрь, волна, двухфазность.

Keywords: turbulence, vortex, wave, two-phase.

Для ракетных двигателей твердого топлива является принципиальным вопрос конденсированной фазы (к-фазы). Это объясняется тем, что почти все современные смесевые твердые топлива содержат в своем составе частицы высокодисперсного алюминия. При сгорании алюминий превращается в оксид Al_2O_3 , который в виде капель, а позже в определенных случаях в виде затвердевших частиц попадает в газообразный поток продуктов сгорания, где образуется двухфазная подвижная среда. Это двухфазный поток и главная его характеристика - дисперсность. Многие годы ученые занимались проблемой дисперсности, изучая при этом её состав и зависимость от различных факторов. Исследовались зависимость от давления, при котором происходит горение, зависимость от состава твердого топлива, зависимость от материала частиц, от соотношения компонентов и т.д. Но самая трудная задача всегда была и остается - исследование размеров (функций распределения по размерам) частиц в зависимости от габаритов установок. Понятно, что можно провести бесчисленное множество отборов на бомбе постоянного давления с зарядами размером с таблетку анальгина. Понятно также, что можно провести достаточно большое количество опытов на модельных двигателях разных размерностей. Но опыты на натуральных крупногабаритных двигателях провести всегда было практически невозможно. Это зависело, прежде всего, от нескольких причин. Во-первых, эти опыты стоили очень дорого. Во-вторых, проведение этих опытов не входило в непосредственные обязанности отработчиков двигателей, и специального планирования в КБ на них не предусматривалось, так как основной документ РК-98 не содержал чисто научных пунктов, без которых и так хватало различных видов испытаний: КИ, КТИ, МВИ и др. И в-третьих, это самое главное, что никакой Главный конструктор не позволит дырявить свою матчасть. Нужно было приложить титанические усилия, чтобы уговорить, убедить, доказать необходимость данного акта. Поэтому натурных отборов частиц из камер сгорания РДТТ очень мало. Их всего два и провел их замечательный русский ученый, прекрасный изобретательный инженер Анатолий Васильевич Куренков. Автору данной работы, который очень много занимался отборами конденсированной фазы, до сих пор непонятно, как ему (Куренкову) это удалось. После отборов частиц Куренковым из двух разных двигателей появилась возможность переносить результаты, полученные в модельных условиях на натурные, а значит на новые перспективные двигатели. Появилась возможность прогноза различных параметров для этих двигателей: достаточно надежно предсказывались потери удель-



Анатолий Васильевич Куренков

ного импульса тяги, связанные с двухфазностью течения в сопле; рассчитывались возможные разгары сопла из-за воздействия частиц, определялись параметры светимости факела, вылетающего из сопла и т.д.

Конечно, не только эти два эксперимента определяли развитие двухфазной газовой динамики, но они стали той надежной опорой и гарантом уверенности в том, что использование результатов модельных экспериментов тоже правомочно и необходимо для исследований сложнейших процессов двухфазной газовой динамики.

В настоящее время появилась необходимость продвинуть эти достижения дальше. Опираясь на знания, полученные в период до девяностых годов, можно решать уже более сложные задачи. Такие, например, как исследование вязких, нестационарных двухфазных течений в соплах РДТТ. До сегодняшнего момента практически все двухфазные газодинамические программы, за исключением может быть [1], построены на решении задач с использованием уравнений Эйлера. При этом наивно считается, что эти уравнения справедливы для сверхзвуковых течений. Эта ошибочная теория для так называемого "идеального" газа не дает даже возможности поставить правильные граничные условия.

Уважая методологические заслуги в развитии газовой динамики великого русского академика Леонарда Эйлера, следует, тем не менее, еще раз сказать, что его уравнения неприемлемы для сверхзвука. Они, к сожалению, не учитывают, помимо вязкости, основное свойство сверхзвуковой газовой динамики - сжимаемость.

Дальнейшее развитие двухфазной газовой динамики должно идти в тесном контакте с преобразованными для сверхзвуковых условий уравнениями Навье-Стокса. Непременно должны учитываться такие важные для сверхзвуковых условий свойства как вязкость и сжимаемость потока. При этом так же должно быть понятно, что в сверхзвуковом потоке турбулентности нет. Она отсутствует. На смену турбулентному течению в дозвуковой области приходит течение с ударными волнами. Турбулентность не исчезает. Она перерождается. Основным видом течения в сверхзвуке - ламинарный, а турбулентность может проявляться только при благоприятных условиях для ударных волн.

Опыты А.В. Куренкова

В этом и следующем разделе описаны уникальные по своей значимости опыты Анатолия Васильевича Куренкова. Рассмотрим два опыта, проведенных на натуральных двигателях, связанных с отбором конденсированных частиц из камер сгорания.

Всегда, когда грамотный специалист приступает к опытам по отбору конденсированной фазы из камеры сгорания, он решает главный вопрос - вопрос изокINETичности. Именно изокINETичность определяет достоверность отбора. От её соблюдения зависит, возьмем ли мы правильную пробу из потока именно с тем реальным спектром распределения частиц или же мы "наосем" больше чем положено "мелочи", либо переберем крупных частиц за счет неправильного подпора.

ИзокINETичность - это равенство скоростей частиц и газа. Если так будет, то из области отбора будет взято без деформации потока адекватное реальности количество частиц в правильном соотношении.

Вопросу изокINETичности Куренков уделял первостепенное значение и прежде чем ставить свой отборник на "натуру", он определил на модельных и воздушных экспериментах необходимую степень геометрического поджатия. Главным элементом в его пробоотборнике была дроссельная шайба на выходе, которая обеспечивала заданный изокINETический режим.

Отборник Куренкова был сконструирован по возможности максимально просто. Принцип отбора состоял в рациональном сочетании элементов сепарирования основной массы частиц и фильтровании остатка. Для сепарации частиц был выбран специально спроектированный циклон, который улавливал до 80 % по массе частиц свыше 5...8 мкм из обозначенной предварительно области отбора в камере сгорания. При этом подход к циклону был организован в виде лабиринтного канала. Остальные частицы улавливались фильтром из пористого нихрома.

Для обеспечения "замораживания" жидких частиц к-фазы, что также определяет достоверность, лишая возможности дробления исходных жидких частиц, использовался специальный кожух для подачи в него жидкого гелия. Гелий был выбран не случайно. Он помимо своих нейтральных химических свойств, обладает еще высокой удельной теплоемкостью, что важно для охлаждения теплоносителя. Внешний вид отборника с циклоном представлен на рис. 1. На рис. 2 показано закрепление этого отборника на одном из крупногабаритных двигателей.

Были взяты отборы из двух двигателей с условным обозначением Г-1 и 5Ж. Их параметры были следующие:

- 1) Г-1 работал на составе 18Д (условное обозначение), при давлении 50 атм. Диаметр камеры составлял приблизительно 800 мм.
- 2) 5Ж работал на составе БК-7 (условное обозначение), при давлении 50 атм. Диаметр камеры - 1600 мм.

После отбора частиц из камеры помимо дисперсного анализа, то есть определения функций распределения частиц по размерам, были проведены химические и рентгено-структурные анализы частиц Al_2O_3 . При этом помимо "ходовой", наиболее часто встречающейся в природе модификации $\alpha-Al_2O_3$ (глинозем), была выявлена достаточно редкая модификация $\gamma-Al_2O_3$, которая, как известно, могла быть получена только искусственным путем при определенных условиях в потоке. Она составляла, как позднее показали специальные анализы, почти одну треть от всей отобранной массы.

Необходимость рентгено-структурного анализа была продик-



Рис. 1 Фото отборника из камеры сгорания в комплекте с циклоном

тована тем, что обе эти модификации отличаются друг от друга, что может в определенный момент исказить истинную картину при подробных расчетах и прогнозах.

Ведь α -модификация Al_2O_3 имеет тригональную или ромбоэдрическую решетку, а γ -модификация имеет тетрагональную кристаллическую решетку. Это различие приводит к тому, что в расчетах необходимо учитывать факт различия их плотностей. Плотность первой $\rho = 4 \text{ г/см}^3$, а второй (γ -модификации) - $3,3 \text{ г/см}^3$.

Основными для практики, помимо собственно спектров частиц, всегда считались значения среднемассовых размеров d_{43} . Его принимали как основной размер для энергетики. Эти размеры были получены и они составили для Г-1 $d_{43} = 7,13 \text{ мкм}$ и для 5Ж $d_{43} = 4,959 \text{ мкм}$.

В исходных данных для энергетики этот размер всегда играл важную роль также и для анализа стойкости концевой части соплового блока. Вплоть до "девяностых" этот размер был, пожалуй, самым популярным еще и потому, что в расчетных методиках он удобно вписывался в основные константы. При его использовании результаты экспериментов и расчетов часто сходились. Но в своих работах Анатолий Васильевич изучал не только этот "венчонный" размер. Он понимал, что это - очень удачная случайность. Поэтому всегда наряду с последним приводил в таблицах и другие размеры, например, d_{32} . В этом он был безусловно прав и опыт эксплуатации подобных исходных данных это подтверждает. Ведь самым точным является функция распределения частиц по размерам, а любые средние размеры, построенные на ее базе, могут удовлетворить лишь частные интегральные потребности. В тот период времени (1969 и 1970 гг.) опыты Куренкова были поистине кругом спасения. Они на тот момент полностью удовлетворяли потребностям, связанным с отработкой новых, перспективных двигателей и не потеряли своё значение и в настоящее время.

Одновременные отборы к-фазы из камеры и сопла

Полученные при отборе из камеры сгорания спектры распределения к-фазы дают широкую возможность изучать эволюцию частиц. При этом исследуются такие эффекты как коагуляция, дробление, сепарация, которые в двигателях твердого топлива постоянно присутствуют в силу широкой дисперсии функции распределения и многообразия конструктивных решений. Было сочтено целесообразным провести на одном и том же крупногабаритном модельном РДТТ одновременные отборы из камеры и сопла, которые показали бы динамику преобразования частиц и их дисперсность в зависимости от длины координаты вдоль оси двигателя. Специально для этого была разработана и оснащена экспериментальная установка, состоящая из пробоотборника в камере сгорания [2] и пробоотборника (рис. 3) непосредственно

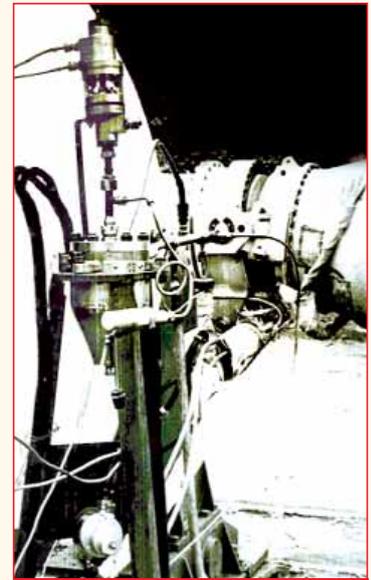


Рис. 2 Двигатель с установленным отборником из камеры сгорания

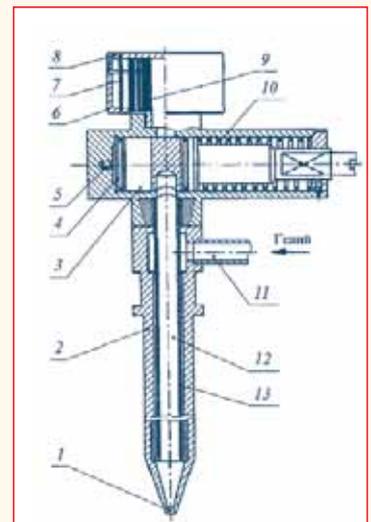


Рис. 3 Схема отборника: 1 - приёмное отверстие, 2 - корпус, 3 - канал, 4 - затвор, 5 - трубка подачи воздуха, 6 - ловушка конденсата, 7 - пористый фильтр, 8 - дроссель, 9 - лабиринт, 10 - пружина, 11 - трубка подвода гелия, 12 - газоход, 13 - рубашка охлаждения

на срезе сопла. Основные элементы пробоотборника со среза сопла были прототипом отборника из камеры сгорания А. В. Куренкова. Оба отборника к моменту проведения экспериментов были хорошо отработаны на небольших модельных двигателях, предназначенных для систематических исследований различных параметров двухфазной среды.

Установка по совместному отбору из камеры и сопла имела следующие основные конструктивные параметры и была рассчитана на следующие режимы: состав БК-8 (условное обозначение), давление 60 атм, диаметр камеры 310 мм.

На этой установке было проведено пять опытов с отбором из камеры и пять опытов со среза сопла. Причем три опыта были проведены с отбором со среза полного сопла, а два с соплами, полученными после токарной обрезки концевой части. Длина полного сопла от критики составляла $\bar{x} = x/r_{кр} = 13$, а две другие относительные продольные координаты, где производился отбор, были равны 1,5 и 2,5. Обработка экспериментов производилась во всех случаях одинаково. Были обеспечены идентичные условия, как подготовки пробы, так и её дисперсный анализ. Анализ дисперсности проводился по методике ОИХФ АН СССР под электронным и оптическим микроскопами.



Роман Рубенович Акопов

В процессе отборов и последующего дисперсного анализа удалось получить функции распределения частиц по размерам и их средние моменты (размеры). На рис. 4 представлено изменение среднемассового размера d_{43} по длине двигателя. В результате анализа кривой $d_{43}(\bar{x})$ уже стало видно, что начиная с критического сечения размер частиц практически не изменяется. Был обнаружен эффект насыщения. Более того, экспериментальный разброс значений d_{43} в сверхзвуковой части сопла оказался незначителен. Сложилось ощущение, что по всей длине сверхзвукового сопла частицы практически одинаковы. С целью подтверждения этого факта для сравнения были проведены расчетные исследования. Их провел талантливый физик, специалист по проблемам горения и эволюции дисперсной фазы в РДТТ Роман Рубенович Акопов. Его расчеты подтвердили эмпирическую находку.

Из рис. 4 уже последовали новые выводы. Во-первых, было показано, что до определенного момента среднемассовый раз-

мер частиц растет вдоль оси двигателя. Этот факт подтверждает, что основным процессом в камере сгорания является коагуляция. Далее в дозвуковом сопле, после достижения своего максимального значения на кривой распределения вдоль оси двигателя в месте сопряжения камеры и сопла, частицы начинают мельчать. Происходит падение кривой из-за нарастающих процессов дробления. Ведь скорость потока в дозвуковом сопле резко увеличивается и далее, не так далеко от критического сечения этот процесс останавливается. При внимательном рассмотрении этих частиц под оптическим микроскопом можно увидеть, что они сферические (от ~ 0 до 5 мкм). Единичные частицы размером более 5 мкм начинают отличаться от идеально сферических. Они видимо еще могут подробиться, но складывается ощущение, что процесс дробления уже закончился. Действительно, по оценкам, проделанным для этой области, число Вебера $We = d_s \rho V^2 / \sigma$ принимает уже критические значения. Здесь d_s - диаметр жидкой частицы; ρ и V - плотность и скорость газового потока; σ - коэффициент поверхностного натяжения материала частицы. То есть в этой области потока жидкие капли (d_s) за один или несколько раз дробятся до своего критического размера $d_{s,кр} = We_{кр} \cdot \sigma / (\rho \cdot v^2)$. И, по-видимому, в этом месте, чуть дальше от критического сечения, дробление прекращается. Все капли становятся одинаковыми. При этом функция плотности распределения частиц по размерам становится практически δ -функцией Дирака. Это происходит для разных капель по-разному. Здесь важную роль играют свойства материалов капель. И тогда, начиная с некоторого расстояния, находящегося практически у критики, эволюция частиц прекращается. По сверхзвуковому соплу летят частицы практически одного размера. Дробления дальше нет из-за ограничений, наложенных числом Вебера. И коагуляции тоже нет, так как скорости для её осуществления очень велики. Поток становится монодисперсным. Таким образом, для сверхзвуковых сопел появляется возможность существенно упростить расчетные методы по сравнению с дозвуковым соплом.

Фундаментальные уравнения двухфазной сверхзвуковой газовой динамики

Построение двухфазных сверхзвуковых методик и программ на базе уравнения Эйлера влечет за собой несколько недостатков:

- 1 - неучет вязкости потока;
- 2 - неучет его сжимаемости;
- 3 - ненужный расчет дробления частиц;
- 4 - ненужный расчет коагуляции частиц (сверхзвуковые скорости и отсутствие турбулентности в сверхзвуке).

Задача может быть исправлена, если заменить уравнение Эйлера на уравнение, приведенное в работе автора [3]:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} = - \text{grad} \left(p + \frac{4}{3} v \frac{dp}{d\tau} \right).$$

В отличие от традиционного подхода новая методика будет учитывать и вязкость, и сжимаемость. При этом по аналогии с наиболее продвинутыми в этом плане работами [1, 4, 5], можно считать, что остальные уравнения сохранения практически не изменятся. Да, действительно, уравнения неразрывности останутся, так как для газа и для частиц они идентичны.

Их совокупности (газ + частицы) условно заменяются "газом" частиц:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_s \vec{V}_s) = 0.$$

Уравнения момента импульса для газа, частиц и уравнение энергии примут вид, аналогичный [4]. В данной работе они рассматриваться не будут, так как требуют особых комментариев. Они будут представлены со специальным анализом в следующей работе. В данной работе ограничимся только уравнением импульса:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \vec{V} \text{grad} \vec{V} + \frac{1}{\rho} \text{grad} \left(p + \frac{4}{3} v \frac{dp}{d\tau} \right) + \frac{\rho_s}{\rho} \vec{f} = 0.$$

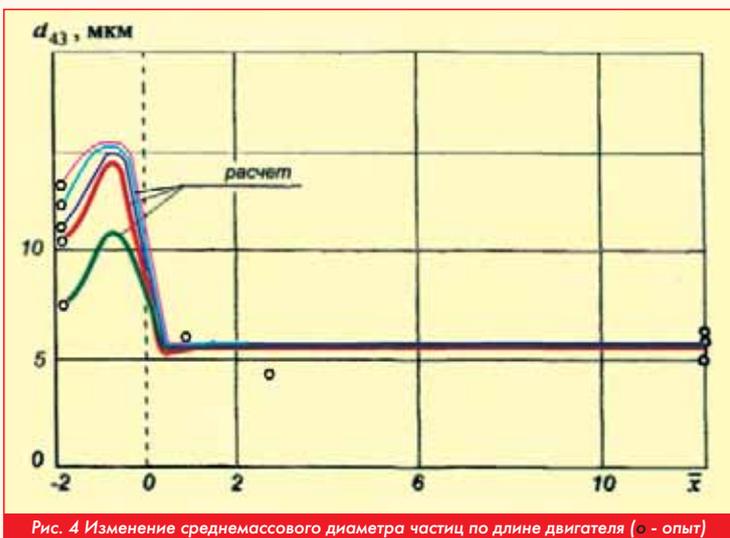


Рис. 4 Изменение среднемассового диаметра частиц по длине двигателя (o - опыт)

Здесь \vec{f} - функция сопротивления, зависящая в первую очередь от величины отставания частиц от газа, разности скоростей. Кроме того, как известно, эта функция также зависит от свойств материала частиц и газа.

Уравнения записаны для условий двухфазного сверхзвукового потока, при этом учтено, что:

- 1 - турбулентность в сверхзвуковом сопле отсутствует [3];
- 2 - дробление и коагуляция отсутствует, а среда монодисперсная;
- 3 - течение вязкое и сжимаемое.

Конечно, делая такие сильные заявления, автор понимает всю ответственность перед предшественниками, но воздает померную им благодарность за то, что с их помощью появилась возможность внести исправления в традиционные уравнения. Автор также понимает, что каждый причастный к данной проблеме ученый, внутренне осознает необходимость сделанных уточнений и искренне надеется на активное участие в дальнейшем разреше-

нии этой очень сложной проблемы - двухфазной сверхзвуковой газодинамики сопел. 

Литература

1. И.М. Васенин, В.Г. Бутов, А.А. Глазунов и др. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Изд. Томского Университета. 1986 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность плотных дисперсных потоков. Параксиальный эффект Федотова. // Двигатель № 4, 2007 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Фундаментальные уравнения сверхзвуковой газовой динамики и новый метод профилирования сопел ЖРД. // Двигатель № 3, 2013 г.
4. Л.Е. Стернин, А.А. Шрайбер. Многофазные течения газа с частицами. М. Машиностроение. 1994 г.
5. Р.И. Нигматулин. Основы механики гетерогенных сред. М. Наука. 1978 г.

Связь с автором: swgeorgy@gmail.com