

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ (ПАМЯТИ Д.Д. ГИЛЕВИЧА)

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Вот уже пять лет, как нет с нами первого Главного конструктора двигателей гиперзвуковых летательных аппаратов, Дмитрия Дмитриевича Гилевича. В такие даты мы, обычно, вспоминаем наследие, которое оставляют талантливые люди, подобные ему. Будучи великолепным конструктором, за плечами которого сверхзвуковая крылатая ракета "Москит", гиперзвуковая газодинамическая летающая лаборатория "Холод" и другие эпохальные создания, Дмитрий Дмитриевич был выдающимся ученым и педагогом. Он создал ряд направлений в газодинамической науке и воспитал большое число учеников. Гиперзвуковую лабораторию, которую он создал при Московском авиационном институте, можно ставить в ряд самых современных в мире "золотоносных рудников знаний". Студенты и аспиранты МАИ с благодарностью вспоминают имя профессора, подарившего им возможность пользоваться этим наследием. Дмитрий Дмитриевич, несмотря на свои правительственные награды и другие заслуги, всегда оставался простым человеком и был доступен каждому, желающему получить добрый совет и практическую помощь. Дмитрий Дмитриевич был великолепным другом, который в трудную минуту всегда придет на помощь и разрешит неразрешимые вопросы.

При проектировании и создании ракетных двигателей (РД), обладающих высокими значениями удельного импульса тяги и массовым совершенством, любой прогноз не обходится без привлечения газовой динамики. И хотя газовая динамика напрямую не связана с получением конечных интегральных параметров, она всегда проявляется в качестве граничных условий при расчетах тепломассообмена, прочности, энергетики и пр. В итоге, от качества выдаваемого с её помощью научного продукта (газового поля и др.) зависит точность предсказания выходных характеристик и в итоге надежность создаваемой конструкции. В определенном смысле газовая динамика является решающим звеном во всей цепочке разработки РД. В связи с этим, не вызывает сомнения важность создания таких математических продуктов, которые адекватно отражают особенности течения и описывают физическую сторону задачи в целом.

В настоящее время разработано большое количество газодинамических программ и даже целых комплексов по расчету сложнейших ситуаций, возникающих в процессе создания РД. Главное, что газодинамическая наука снабдила исследователей фундаментальными феноменологическими уравнениями, позволяющими эти программы создавать. За эти уравнения мы, потомки, сегодня должны быть благодарны таким гениям как: Даниил Бернулли, Леонард Эйлер, Джордж Стокс, Герман Гельмгольц и др. И мы должны аккуратно и трепетно распоряжаться тем наследием, которое они оставили. Всегда, прежде чем пользоваться этими уравнениями, нужно задать себе вопрос: "А не испорчу ли я их? Не выдам ли я свои преобразования за их оригинальные? Не выхолю ли я существо, что приведет к искажению той реальной картины природы, которой на протяжении веков они соответствовали?".

Наиболее всеобъемлющими в части учета параметров среды и условий течения в настоящее время считается векторное уравнение Навье-Стокса. Второе очень важное уравнение, полученное раньше, чем уравнение Навье-Стокса - это уравнение Эйлера. По структуре эти уравнения полностью совпадают за исключением двух членов, содержащих вязкость и сжимаемость. В связи с чем, уравнение Эйлера предназначено лишь для решения задач в предположении идеального газа.

Часто упоминаемые выше уравнения используются с излишней долей предположений и упрощений. Это приводит к получению искаженных значений скоростей и основанных на них последующих расчетов. Все эти допущения и упрощения делаются из-за больших трудностей при решении как уравнения Навье-Стокса, так и уравнения Эйлера. Эти трудности носят технический, а главное временной характер.

В данной работе предпринята попытка критического анализа уравнения Навье-Стокса применительно к сверхзвуковым (гиперзвуковым) течениям с целью его преобразования к виду, удобному для практических расчетов.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ

В настоящее время сложилась такая ситуация в ракетной технике, да в общем и в других отраслях (энергетике, авиационной технике, в корабельных дисциплинах и др.), когда дозвуковые течения в основном рассчитываются с помощью уравнения Навье-Стокса, а сверхзвуковые - с помощью уравнения Эйлера. Конечно, это не всегда так, но покажем, почему это принимается.

При расчете сверхзвуковых сопел (и других сверхзвуковых аппаратов) предполагается, что с увеличением степени расширения сопла $\bar{r}$ увеличивается скорость потока, а значит увеличивается и число Рейнольдса. Это эквивалентно тому, что если бы уменьшалась величина вязкости, число Рейнольдса также активно увеличивалось бы. Появилась идея: считать, что при увеличении степени расширения появляется эффект "исчезающей вязкости". Это так же равносильно тому, что пограничный слой тонкий. Другими словами, эффект появляется тогда, когда число Рейнольдса стремится к бесконечности. И действительно, на первый взгляд все говорит о том, что число Рейнольдса стремится увеличиваться: скорость растет, характерный размер растет, вязкость, которая в знаменателе, падает и только плотность ведет себя не так. Но обычно легкомысленно считают, что она сильно не повлияет. Проведем следующие выкладки. Распишем число Рейнольдса с учетом постоянства расхода через камеру и сопло

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{G}{(\pi/4)d\mu}.$$

Разделим число Рейнольдса на аналогичное, но взятое в критическом сечении

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

где

$$\bar{\mu} = \mu/\mu_{кр} \text{ и } \bar{r} = d/d_{кр}.$$

После анализа большого числа термодинамических расчетов можно сделать вывод о том, что $\bar{\mu} \sim 1$, тогда

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

То есть число Рейнольдса не может бесконечно увеличиваться. Оно имеет максимальное значение в критике. Да, оно растет в дозвуке, но падает в сверхзвуковой части сопла. И тогда предположение об эффекте исчезающей вязкости рушится. Другими словами вязкость при расчете сверхзвуковых течений обязательно надо учитывать.

Далее, используя уравнение Эйлера для расчета сверхзвуковых течений, часто игнорируется сжимаемость среды. Ведь она заложена в уравнении Навье-Стокса в последнем члене

$$(1/3) \mu \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{V}.$$

Что же остается? Решать уравнение Навье-Стокса в полной постановке и в сверхзвуке. Да, действительно, так пытаются делать. Но! Известно весьма ограниченное количество авторов, которые сделали это когда-то точно без упрощений. Например, В.А. Горяинов, решая задачу натекания на торцевое препятствие. Большинство авторов искренне выдают уравнения Рейнольдса за уравнения Навье-Стокса. В чем тут порок? В том, что уравнения Навье-Стокса искусственно превращены О. Рейнольдсом из феноменологических уравнений в статистические. "Распульсирование" ведущих членов уравнений справедливо лишь для скаляров - давления и плотности. Представление векторной величины скорости неправомерно. Об этом просто договорились, доверчиво принимая разработанные Рейнольдсом правила осреднения. Появление уравнений Рейнольдса в два раза увеличило количество неизвестных. Потребовалась многовековая кропотливая работа, чтобы замкнуть уравнения искусственно введенными эмпирическими моделями турбулентности. Все эти модели были получены в "холодной плосковоздушной" постановке с использованием термоанемометров.

Другими словами, турбулентность насильно затолкнули в уравнения Навье-Стокса. И далее встает вопрос: "А справедливо ли это, особенно, для условий сверхзвукового течения?"

Что же получается? Считать сверхзвук по программам, составленным на базе уравнений Эйлера неправильно, но и считать по уравнениям Рейнольдса тоже не правильно. Остается честно считать по уравнениям Навье-Стокса, либо дополнительно проанализировать физику данного процесса и уже на основании этого анализа записать другие, новые уравнения, которые эквивалентны уравнениям Навье-Стокса, но свободны от недостатков перечисленных выше уравнений.

РЕАЛЬНАЯ КАРТИНА ТЕЧЕНИЯ В ДВИГАТЕЛЯХ

Вывод уравнения Эйлера в те далекие времена проводился без учета реальных свойств газа, таких как сжимаемость и вязкость. Все было сделано для "идеального" газа. Ужесточение требований к уравнениям произошло позже, когда инженеры почувствовали реальное воздействие этих параметров при проектировании и создании промышленных установок. Так, например, в пароходостроении долго не могли объяснить, почему не хватает горючего для движения и почему пароходы останавливаются раньше, чем это показывали расчеты, сделанные на основе идеальных подвижных сред. Появление уравнений Навье-Стокса ознаменовало целую эпоху. У людей появился инструмент для расчетов. Исследования показали, что трение между слоями жидкости вносит свои особенности, а трение жидкости о стенку аппарата может серьезно воздействовать на его движение. Для простоты понимания великий немецкий ученый Людвиг Прандтль специально выделил пристенную область, назвав её пограничным слоем. После этого ни у кого не осталось сомнений, что выделение этой области с большим градиентом скорости из потока весьма рационально и полезно для практики. Позднее заметили, что эта тончайшая область может содержать ламинарный участок, непосредственно "прилипший" к стенке и турбулентный. Предполагалось, что течение в ламинарной области послойное и исключает наличие вихрей. Взаимодействие между слоями происходит только на молекулярном уровне. Характеристикой такого течения с благословения Исаака Ньютона стала физическая величина - вязкость. При увеличении чисел Рейнольдса пристеночный поток становился турбулентным, то есть в нем появлялись разного рода вихри. Известно, что в математической символике вихрь обозначается как $\text{rot } \vec{V}$. Другими словами, если $\text{rot } \vec{V} = 0$, то поток ламинарный, если $\text{rot } \vec{V} \neq 0$ - вихревой (турбулентный).

Понятно, что вблизи стенок поток всегда ламинарный, даже вблизи стенок сверхзвукового сопла. Внутри камеры сгорания поток в зависимости от числа Рейнольдса, как правило, турбулентный. Под словом турбулентность в данном случае понимаются все возможные ситуации: вращение, кручение, винтовые течения и т.д. В сверхзвуковой области - поток везде ламинарный (рис. 1 - 3). Ранее [1] уже было показано, что, начиная с критического сечения турбулентный поток переходит в ламинарный. Скорость в этой области и далее ста-

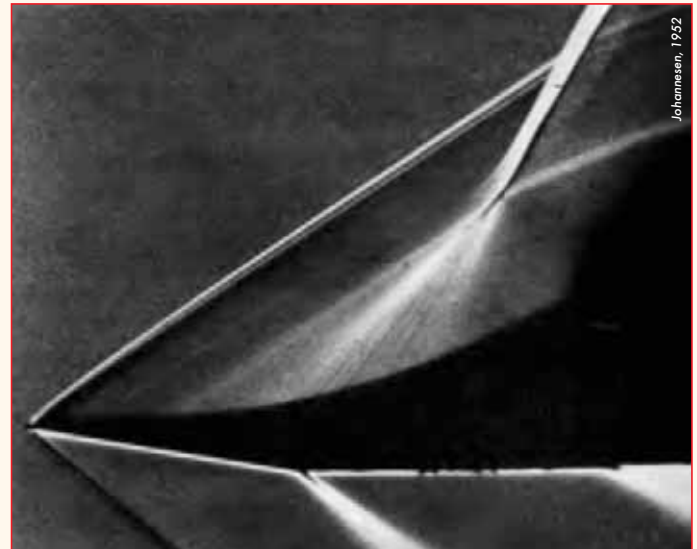


Рис. 1. Обтекание воздухозаборника ($M = 1,96$) с положительным градиентом давления



Рис. 2. Ламинарное обтекание плоской пластины (внизу), безградиентное течение при $M = 3$

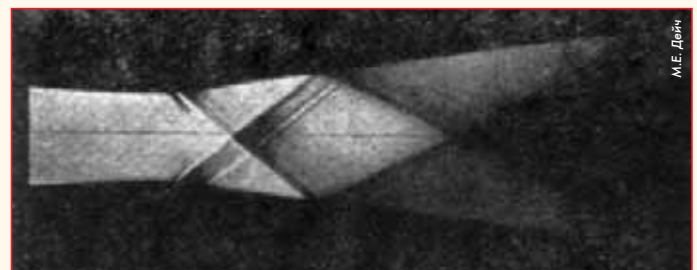


Рис. 3. Ламинарное течение в плоском сопле ($M_0 = 2,57$), с отрицательным градиентом давления

новится равной скорости звука и выше, а значит, она равна или больше тепловой скорости движения молекул газа на протяжении всего объема газа в сопле. Для иллюстрации на рис. 4 изображена схема течения в двигателе. Серая область в камере сгорания обозначает область турбулентного потока; синяя область вдоль стенок камеры и далее по всему сверхзвуковому объему - ламинарную.

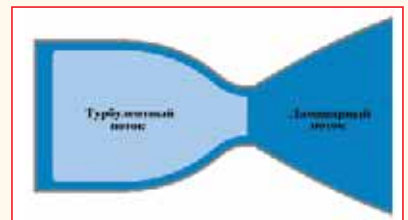


Рис. 4. Области течения реального газа в двигателе

Далее очень важно сделать следующее заявление. Оно достаточно логично и в разговорах газодинамиков между собой оно не вызывает споров. Однако в литературе четко этого не написано. Заявление гласит о том, что если две линии тока в сверхзвуковом потоке пересекаются, то возникает скачок уплотнения. Следовательно, обратные токи в сверхзвуковом потоке невозможны. То есть в сверхзвуковом потоке невозможно появление вихревых течений и всегда они будут в сверхзвуковом потоке равны нулю. Отсюда следует логичный вывод о том, что турбулентность в сверхзвуковом потоке отсутствует [2], Это положение, которое было положено в основу дальнейших рассуждений.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА

Итак, основываясь на позициях о том, что уравнение Навье-Стокса учитывает правильно особенности течения реальных жидкостей и газов, проанализируем его с целью нахождения новых уравнений, отражающих основные свойства сверхзвуковых течений. По аналогии с [3] запишем уравнение Навье-Стокса в векторной форме

$$\rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} = -\text{grad } p + \mu \Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \text{grad div } \vec{V}.$$

Раскрывая субстанциональную производную и лапласиан скорости, получаем

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \rho [\text{rot} \vec{V} \cdot \vec{V}] + \text{grad} p - \frac{4}{3} \mu \text{grad div } \vec{V} + \mu \text{rot rot } \vec{V} = 0.$$

Учитывая основное утверждение о невозможности существования в сверхзвуковом потоке вихрей, избавляемся от них

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \text{grad} \left(p - \frac{4}{3} \mu \text{div } \vec{V} \right) = 0.$$

Привлекая уравнение неразрывности

$$\frac{dp}{d\tau} + \rho \text{div } \vec{V} = 0,$$

избавляемся от дивергенции в последнем члене

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \rho \text{grad} \frac{\vec{V}^2}{2} + \text{grad} \left(p + \frac{4}{3} \rho v \frac{dp}{d\tau} \right) = 0.$$

С целью адаптации данного векторного уравнения к условиям сверхзвукового сопла, запишем его в цилиндрических координатах (r, φ, z) . Для этого найдем коэффициенты Ламе

$$H_r = 1; H_\varphi = r; H_z = 1.$$

Тогда в скалярном виде система уравнений уже в осесимметричной постановке примет вид

$$\rho \frac{\partial V_r}{\partial \tau} + \rho V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial \left(p + \frac{4}{3} \rho v \frac{dp}{d\tau} \right)}{\partial r} = 0.$$

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + \rho V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial \left(p + \frac{4}{3} \rho v \frac{dp}{d\tau} \right)}{\partial z} = 0.$$



Рис. 5. На 70-летию МАИ. Д.Д. Гилевич (в центре), его жена Ася Джалаловна и автор статьи

В векторной форме система преобразуется в уравнение, похожее на уравнение Эйлера

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

причем в правой его части появляется новый член, учитывающий сжимаемость и вязкость. Очевидно, что новое уравнение справедливо для любого ламинарного течения и полностью удовлетворяет всем признакам реального сверхзвукового потока.

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность и звук. // Двигатель. № 4, 2006 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность двухфазных течений. // Двигатель. № 2, 2006 г.
3. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М. Наука, 1974 г.



ПКР "Москит"

ИНФОРМАЦИЯ: Разработка SpaceLiner продолжается

Исследователи из Немецкого Аэрокосмического Центра (DLR) разрабатывают гиперзвуковой лайнер SpaceLiner. Проект создания гиперзвукового лайнера SpaceLiner, был одобрен Евросоюзом и Европейским космическим Агентством еще в 2005 г.

Планируется, что SpaceLiner будет многогоразовым космолетом и сможет достигать скорости 24 140 км/ч (приблизительно 24 скорости звука), что позволит ему облететь земной шар за 3 часа.



Предполагается, что SpaceLiner доставит 100 пассажиров из Европы в США за 60 минут и 50 пассажиров из Австралии в Европу за 90 минут.

По словам разработчиков концептуального проекта SpaceLiner, для его реальной постройки в Европе потребуется около 25 лет. Создатели концепта надеются, что их гиперзвуковой самолет сможет транспортировать пассажиров в 2050 году.

На данном этапе, инженеры-конструкторы рассматривают высокоэффективные технологии, которые можно было внедрить в проект гиперзвукового самолета, изучают возможные варианты двигателей и траектории полета данного космолета.

Кроме всего прочего, инже-



неры работают над инновационной системой охлаждения и системой безопасности пассажиров и летчиков на борту этого гиперзвукового лайнера.

По словам представителей DLR, дизайн и форма самолета SpaceLiner до сих пор не определены и находятся в процессе разработки. Проект нуждается в финансовой поддержке инвесторов.