

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В РДТТ. ИМПЕДАНС ПЕТРОВА

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Теоретический анализ динамических ситуаций показал, что работа ракетного двигателя на твердом топливе всегда проходит в нестационарном режиме. Необходимо проводить корректный расчет с привлечением нестационарных уравнений Навье-Стокса и определять поля скоростей в зависимости от всех трех координат x, y, z и времени. Показано, что неустойчивость в РДТТ может быть временная и не повлиять на состояние материальной части двигателя. Разработан метод расчета кривой "пушечного" выхода на режим с динамическим последствием. Разработан метод для определения импеданса и скорости распространения волновых возмущений в каналах зарядов из смесевых твердых топлив крупногабаритных РДТТ.

Работа ракетного двигателя на твердом топливе отличается от работы ЖРД тем, что она всегда проходит в нестационарном режиме. Невозможно выделить временные интервалы, где параметры остаются постоянны и не зависят от времени. Да, конечно, можно так подобрать заряд, чтобы давление во всё время работы РДТТ будет постоянно, но это еще не значит, что при этом останутся постоянными другие параметры. Например, изменение проходных сечений в камере сгорания двигателя за счет выгорания заряда приводит к деформации поля течения продуктов сгорания. При этом изменяются особенности течения, возникают новые направления потоков, появляются новые или пропадают старые вихри, жгуты, винтовые течения. То есть, другими словами, турбулентность в процессе работы камеры сгорания постоянно меняется. Это изменение естественно носит локальный характер и в различных областях камеры все происходит по-разному.

Традиционно принято считать, что проблем в камере сгорания РДТТ нет. Это и понятно - рассчитай заряд и по одномерной методике выпусти продукты сгорания через сопло. Главное, не забудь, не упusti потери полного давления. Более сложная картина, конечно, формируется около дозвуковой части соплового блока. Там действительно возникают встречные потоки, могут возникать тороидальные вихри и все такое прочее, но все это не те проблемы, которые являются лимитирующими. Как правило, при разгаре заряда они исчезают. Более стесненные условия для потока переходят в более свободные - и турбулентность упрощается. Высокодифференцированные составляющие турбулентности, такие как торсионные жгуты и сложные винтовые течения "разглаживаются" и поток стремится к ламинарному. Но в начале работы РДТТ нужно внимательно следить за процессами, которые могут привести к нерасчетным и даже аварийным ситуациям. Это - процессы выхода на режим, сопровождающиеся гидроударом от продуктов сгорания воспламенителя и возможное возникновение высокочастотных и низкочастотных колебаний движущейся среды. Последняя ситуация возникает в случае неправильно спроектированного заряда. Ведь известно, например, что в зарядах со щелями (рис. 1) образуются сложные вихревые течения, заставляющие колебаться перья заряда. Это неоднократно отмечалось в литературе. Так, упомянутые выше процессы в дозвуковой части сопла, со своей сложной встречной структурой потоков, или результат использование двухсоставных зарядов с сильно различающимися скоростями горения. Там, на разделительной линии могут формировать-

ся не только градиентные волны Кельвина-Гельмгольца, но и образовываться срывные циклические течения, генерирующие уже акустическую циклику. Таким образом:

1. Необходимо знать - будет ли при запуске двигателя появляться динамика переходного процесса, и насколько это опасно для целостности РДТТ; и
2. Хорош ли заряд (или в целом двигатель) с точки зрения, например, ВЧ-устойчивости.

О прогнозе неустойчивости РДТТ

В ракетном двигателе твердого топлива в качестве камеры сгорания (в классическом ее понимании) представляется поверхность горения заряда, ограничивающая свободный объем, заполненный продуктами сгорания. При этом бессмысленно говорить о постоянной форме камеры и в расчетах следует учитывать динамику ее изменения.

В каждый момент работы двигателя этот объем увеличивается и поле течения меняется, что необходимо учитывать при расчете акустических параметров и прогнозе неустойчивой работы РДТТ. Если ЖРД сразу заработал в неустойчивом режиме, то этот двигатель изначально не годен для эксплуатации. Но! Если в РДТТ в процессе изменения формы камеры в том последнем понимании возникают на некоторое время конфигурации, которые провоцируют неустойчивость, то это еще не повод браковать двигатель. Такая ситуация представлена на рис. 2. Виден участок с автоколебаниями. Теперь все зависит, насколько этот участок продолжителен.

Каким же образом прогнозировать, когда и на какое время возникает неустойчивая ситуация? Для этого необходимо рассчитать поле течения продуктов сгорания по времени $V = V(x, y, z, \tau)$. То есть нужно найти в каждой точке пространства камеры сгорания абсолютное значение скорости истечения для каждого выгоревшего слоя заряда. Расчет весьма желательно проводить с использованием феноменологических уравнений Навье-Стокса, так как результаты должны зависеть от молекулярной вязкости (ν) и

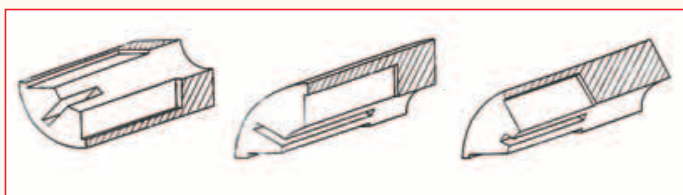


Рис. 1. Примеры форм заряда РДТТ

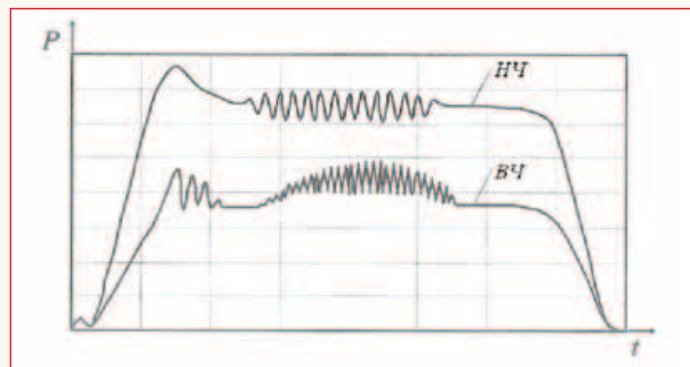


Рис. 2. Примеры неустойчивых режимов работы РДТТ

сжимаемости. Понятно, что без сжимаемости говорить о возникновении колебаний бессмысленно. Дальнейший алгоритм расчета известен [1] и заключается он в нахождении в каждой точке пространства камеры сгорания критерия Филина-Зенина, который не должен превышать некоторой критической величины, без которой колебательные решения векторного уравнения Навье-Стокса невозможны. В самом общем виде это необходимое условие имеет вид

$$\Phi Z = \frac{\kappa V^4}{\nu a^2} \cdot \frac{d \frac{\nu}{\rho \omega^2 V}}{dr} > \frac{1}{4},$$

где ν - абсолютное значение скорости газового потока. Достаточным условием будет постоянство $\rho \omega^2 V$.

Далее выстраивается зона неустойчивости, где $\Phi Z > 1/4$.

Эти области являются потенциальными акустическими излучателями. Причем, необходимые и достаточные условия указывают на присутствие автоколебаний. Теперь если эти акустические излучатели будут работать в когерентном режиме и фазы у них будут совпадать, то возникнет фундаментальный нелинейный эффект синхронизации, когда общая масса колеблющегося газа внутри камеры сгорания начинает колебаться в одном ритме с одинаковой частотой. Эта частота и будет характеризовать резонансную частоту, которая приводит к неустойчивости всего двигателя. Нахождение этой частоты можно осуществить, используя генеральную последовательность синхронных частот Слесарева-Тарарышкина [2]. При этом следует иметь в виду, что первая синхронная частота этой последовательности является ведущей и, в основном, она определяет звук. Все последующие частоты ей как бы аккомпанируют.

Примером неустойчивой работы РДТТ была ситуация, в которой оказался В.А. Пинт (рис. 3). Исследуя возгорание зарядов при низком давлении на безметалльном топливе, он неожиданно получил исторический результат. О колебаниях при выходе на режим будет сказано позже, а вот по маршевому режиму заметим, что он получил осциллографическую запись, имеющую строгую циклическую. Очевидно, что были получены низкочастотные колебания потока, которые инициировало циклическое горение топлива. О механизме возникновения такого горения мы говорить не будем, но отметим, что если бы не мощная металлическая конструкция модельного двигателя, неизбежно произошла бы авария.

Учитывая сказанное выше и по причине относительной простоты конструкции, отработку РДТТ на наличие ВЧ-устойчивости целесообразно проводить комплексно, в отличие от ЖРД, где логично камеру обрабатывать автономно.

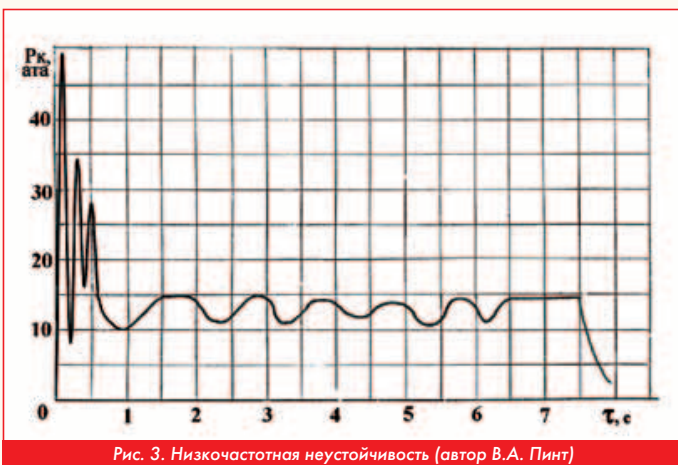


Рис. 3. Низкочастотная неустойчивость (автор В.А. Пинт)

Расчет воспламенителя. Выход РДТТ на режим

Для того чтобы запустить двигатель необходимо запальное устройство. Самые разнообразные конструкции запальников предполагают возможность воспламенения зарядов практически любых конфигураций. Важным при разработке запальника является правильный выбор массы воспламенительного устрой-

ства. Из литературы известно большое число методов и способов расчета массы воспламенительного заряда. Все эти методы эмпирические. Они разработаны для различных конкретных двигателей, а не для той единственной уникальной специфической установки, результаты экспериментов на которой можно было бы распространить на все случаи. Характерной особенностью таких методов является большое количество, как правило, размерных коэффициентов. Однако среди обилия рекомендаций и директив для конкретных штатных запальников можно выделить некоторые общие закономерности, полезные при выборе массы воспламенительного заряда. В работе [3] на многочисленных примерах двигателей разной размерности доказано, что масса воспламенителя должна быть тем больше, чем больше величина свободного объема камеры сгорания РДТТ

$$M_B \sim V_{CB}^{\frac{2}{3}}$$

Специально проведенные автором работы на двигателях с различными габаритами и различными составами воспламенителей и топлив показали также, что масса воспламенителя пропорциональна первой степени номинального давления в камере P_K , ожидаемого после запуска. Была получена универсальная формула, которая в дальнейшем показала весьма прогнозируемые результаты для будущих изделий

$$M_B = \frac{1}{3} P_K \cdot V_{CB}^{\frac{2}{3}}$$

Формула была получена с помощью специальных отстрелов запальных устройств при различных свободных объемах в пустых камерах. Причем, длина и диаметр камеры примерно не выходили за соотношение 2:1. Это было сделано с учетом того, что если в будущем потребуются расчет длинномерных камер, то данный размер будет своеобразным квантом. Целью отстрелов было получение коротких импульсов и определение амплитудных значений по давлению и продолжительности выхода давления на максимальное значение. Кривая выхода на режим вначале имела пологий подъем, переходящий в достаточно протяженный практически прямолинейный рабочий участок с перегибом и далее весьма пологий выход на максимальное значение. Эта кривая была идентифицирована как кривая насыщения. Ее математическое описание было заимствовано из работы [4], где подобная кривая была получена из закона Аррениуса и отнормирована для решения различных физических задач. При этом полученная функция нормального насыщения применительно к данной задаче имела следующий вид

$$\psi(\bar{\tau}) = \frac{1}{\bar{\tau}} \exp\left(1 - \frac{1}{\bar{\tau}}\right),$$

где $\bar{\tau} = \tau / \tau_B$ и τ_B - время воспламенения заряда.

После чего величину давления в области выхода на режим в любой момент времени стало возможным определить по формуле $P = P_K \cdot \psi(\tau)$.

Обычно в экспериментах дают амплитудный запас равный ~10...20 % от P_K .

Если воспламенитель выбран неправильно, и массы для полного воспламенения не хватает, то двигатель может не воспламениться. Если же воспламенителя взято больше, то после его срабатывания может возникнуть колебательный режим и даже неустойчивость. На рис. 4 представлен поистине хрестоматийный результат, иллюстрирующий "пушечное" воспламенение и последующее горение кусков топлива в процессе разрушения двухсоставного заряда.

Следует отметить, что если система ВЧ-устойчива, то есть устойчива к акустическим возмущениям, то даже жесткое воздействие на систему не приведет к автоколебаниям. При этом система воспримет первоначальную амплитуду и начнет колебаться, но благодаря своим внутренним свойствам, а именно, из-за вязкости и кривизны линий тока [5], система со временем подавит эти

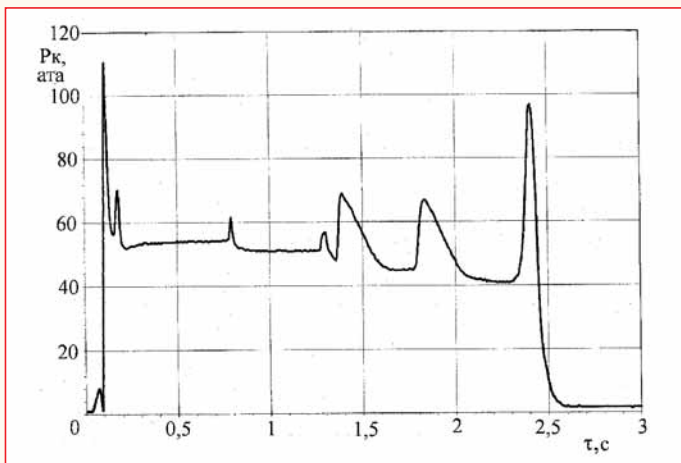


Рис. 4. Выход на режим с последующим разрушением двухсоставного заряда (автор С.А. Дегтярёв)

колебания и выйдет на номинальный режим. Методика расчета таких колебаний приведена в [5] и сводится к нахождению решения главного уравнения колебательного звена с постоянной правой частью (условие гидроудара). Решением этого уравнения является

$$P = A \sin(\omega_0 \tau + \varphi) + P_k.$$

Здесь под амплитудой понимается превышение давления от воспламенителя над номинальным значением. Остальные параметры, входящие в данное уравнение, рассчитываются по анало-

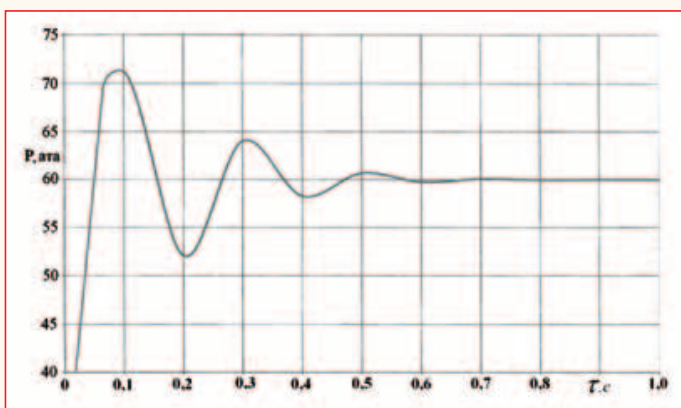


Рис. 5

гии со случаем при автоколебательном режиме. На рис. 5 представлен расчетный результат, иллюстрирующий возможную динамику выхода РДТТ на режим.

Импеданс Петрова

Алексей Алексеевич Петров - известный в России и за рубежом специалист по проблемам акустической неустойчивости камер сгорания РДТТ [6]. Автор работ по нестационарным виброимпульсным процессам в камерах сгорания РДТТ при стендовых и летных испытаниях. Провел систематические исследования по воздействию мелкодисперсных частиц на акустические колебания в камере сгорания с целью их устранения. Он впервые объяснил явление флаттера сверхзвуковых сдвигаемых сопловых насадков. Применительно к РДТТ определил понятие акустического импеданса для учета податливости стенок заряда при воздействии на него акустических нагрузок. В последние годы Алексей Алексеевич занимается динамической устойчивостью работы узлов железнодорожных транспортных средств в рамках конверсии.

Для многих вопросов динамики сжимаемых сред имеет значение величина, называемая акустическим импедансом. Формаль-



А.А. Петров

но она записывается как произведение плотности на местную скорость звука. По существу это - мера жесткости среды, то есть суммарное сопротивление динамическим процессам. Запись в виде двучлена подразумевает идеальные условия течения жидкостей и газов по каналам, камерам и соплам. Но уже в начале двадцатого века великим российским ученым Н.Е. Жуковским было обращено внимание на особенности течений жидкостей в каналах с податливыми стенками. Жуковский предложил учитывать податливость стенок и по аналогии с методом Кортвега была получена зависимость скорости звука с учетом жесткости материала конструкции. Это были чугунные трубы от московского водопровода. Принимая выдвинутую Жуковским идею как начальную посылку, А.А. Петров применительно к условиям РДТТ получил формулу для скорости звука при течении продуктов сгорания внутри канала заряда. Для определения скорости распространения волн в канале заряда была рассмотрена ситуация, когда канал считался трубой с бесконечно толстой стенкой и с весьма низким модулем упругости материала твердого топлива. Опираясь также на формулу Кортвега и специальные опыты, которые Петров провел с различными составами твердого топлива, он получил зависимость для скорости распространения звука вдоль твердотопливного заряда

$$a_{\Pi} = \sqrt{\frac{E_{\Pi}}{\rho_{\Pi}}}.$$

Это дало возможность вычислить скорость звука при течении продуктов сгорания (без частиц) с учетом податливости заряда

$$a_{\Pi} = \frac{a}{\sqrt{1 + \frac{a}{a_{\Pi}}}}.$$

Главным отличительным признаком продуктов сгорания РДТТ является их конденсированная фаза. Учет ее в практических расчетах осуществляется введением понятия псевдогаза и записывается следующим образом:

$$a_{\Pi\Pi} = a / \sqrt{1 - z} - \text{скорость звука для псевдогаза;}$$

$$\rho_{\Pi\Pi} = \rho (1 - z) + \rho_{Pz} - \text{плотность псевдогаза.}$$

С учетом изложенного выше формула для расчета акустического импеданса была записана в виде

$$J = \frac{\rho_{\Pi\Pi} a_{\Pi\Pi}}{\sqrt{1 + a_{\Pi\Pi} \sqrt{\rho_{\Pi\Pi} / E_{\Pi}}}}.$$

Расчеты, выполненные А.А. Петровым с применением полученных формул дали хорошее совпадение с результатами испытаний натурных РДТТ. Сравнение проводилось с результатами измерений акустических колебаний различных мод. ▲

Литература

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Возникновение неустойчивости в ЖРД. // Двигатель № 2, 2012 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Генеральная последовательность синхронных частот. // Двигатель № 1, 2013 г.
3. А.А. Шишков, С.Д. Панин, Б.В. Румянцев. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М. Машиностроение, 1989 г.
4. Н.Ю. Кочетков. Разработка и верификация метода и программы расчета ВБХ РДТТ с двухсоставными зарядами для перспективных ЛА. // Космонавтика и ракетостроение № 1 (58), 2010 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Гидроудар в ПГС. // Двигатель № 2, 2013 г.
6. А.А. Петров. Определение скорости распространения волновых возмущений в канале заряда РДТТ. М. Центр Келдыша. 2013 г.



Работа РДТТ системы аварийного спасения КА "Аполло"