

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ЖРД

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

При отработке новых и перспективных ЖРД возникновение неустойчивости может приводить к разрушению конструкции. Практическое отсутствие математического аппарата, позволяющего прогнозировать эти процессы, заставляет конструкторов опираться при разработке изделий не на теорию, а в основном на опыт и интуицию. Торсионно-волновая парадигма подвижных сред позволяет расширить возможности теории неустойчивости работы ЖРД. Она предполагает тесную взаимосвязь изменения пространственных конфигураций линий тока, т.е. турбулентных течений, с динамикой, зависящей от амплитудно-частотных характеристик среды. При решении уравнения Навье-Стокса возможно получение нелинейного уравнения, определяющего условия возникновения автоколебаний в работе ЖРД, и, тем самым, определение мер по борьбе с низкочастотной и высокочастотной неустойчивостями.

Устойчивая работа ЖРД зависит от устойчивости процессов, происходящих в его узлах. Это - прежде всего стабильная (устойчивая) работа системы подачи компонентов топлива и правильная конструктивная компоновка камеры сгорания, обеспечивающая устойчивое горение топливной смеси. Под процессом устойчивости в данном случае понимается такая работа двигателя, при которой не возникают колебательные процессы, приводящие к незапланированному изнашиванию, или разрушению его узлов. Очевидно, что процесс неустойчивой работы не является случайным. Этот процесс уже "предусмотрен" конструкцией двигателя и двигательной установкой в целом. При правильном проектировании ЖРД неустойчивая работа исключается.

Потребность в теории неустойчивости ЖРД возникла из практической необходимости, появившейся в процессе создания и отработки новых и перспективных двигателей, в которых наблюдались неожиданно появляющиеся колебания, приводящие к нестационарной работе и разрушению материальной части. Возникла потребность в прогнозе таких ситуаций и разработке математического аппарата, позволяющего уже на стадии проектирования определять характерные параметры двигателя и процессов в нём, исключающие подобные ситуации. В начале теоретических разработок было зафиксировано несколько экспериментальных фактов, связанных с неустойчивостью. Основные из них изложены в книге Е.В. Лебединского [1]. Это: появление звука при работе ЖРД, разрушение из-за возникшего вибрационного горения в процессе работы ЖРД, совпадение частот разрушения с собственными частотами столба газа в объёме камеры и прямая зависимость колебаний от давления и коэффициента избытка окислителя.

В процессе многолетних исследовательских работ многими авторами, в частности Луиджи Крокко [2], было установлено, что первоначальная потеря устойчивости, то есть переход к продолжительным колебаниям системы и, так называемому, вибрационному горению является процессом автоколебательным, нелинейным. Непосредственной атрибутикой данного процесса являются три составляющие: 1 - главная колебательная система (прямая связь), 2 - система подпитки колебаний главной системы энергией (обратная связь) и 3 - система, дозирующая подпитку с целью удержания формы и частоты колебаний, соответствующих первоначальной стадии (диспетчер, клапан и т.п.).

Общая терминология и в частности система обратной связи приняты из электротехники, а точнее из теории электрических цепей. Было найдено сходство электрических и механических колебаний систем, что позволило эффективно воспользоваться их математическим аппаратом, в частности применением теории комплексных функций.

В качестве колебательной системы всегда выступает, так называемый, столб колеблющегося газа и задача определения его параметров сводится к газодинамической. Требуется решить уравнение движения подвижной среды. Подпитка, возникающих в столбе

газа колебаний осуществляется в результате горения топлива. Сам процесс подпитки в замкнутой системе является обратной связью, а в качестве "клапана", дозирующего поступление энергии в колебательную систему выступает нелинейность, которая проявляется как противовес демпфированию (увеличению дисперсии волн).

Главное уравнение колебательного звена

Получение уравнения, описывающего прямую связь автоколебательного процесса, связано с уравнением движения подвижной среды, которое в самом общем виде записывается в форме векторного уравнения Навье-Стокса. В соответствии с этим уравнением в работах [3,4] было доказано три фундаментальные теоремы, положенные в основу получения главного уравнения колебательного звена:

- теорема 1 - об элементарных движениях;
- теорема 2 - о соотношении элементарных движений;
- теорема 3 - о кинетической энергии потока вязкой несжимаемой среды.

Кроме того, было показано, что природа подвижной среды - торсионно-волновая и любое её движение необходимо понимать как безусловную взаимосвязь пространственных и временных процессов. Однако в целях понимания этой взаимосвязи, следует разделить процессы, зависящие от пространства, и процессы, зависящие от времени. В частности при исследовании процессов в ЖРД удобно выделить турбулентность как процесс, зависящий только от пространственной координаты (это смена форм линий тока) и, собственно, неустойчивость - сугубо временной процесс (колебания). Главное уравнение колебательного звена получим из теоремы 3

$$\frac{dp}{d\tau} + \mu V \cdot \Delta V = 0.$$

Здесь p и μ - статическое давление и динамическая вязкость газа.

После дифференцирования это уравнение приобретает вид

$$\frac{d^2 p}{d\tau^2} + \mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} + \mu V \cdot \frac{d(\Delta V)}{d\tau} = 0.$$

Отдельно рассмотрим производную

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{dV}{dp} \cdot \frac{dp}{d\tau} = - \frac{dV}{\rho V^2} \cdot \frac{dp}{d\tau}, \text{ или } \frac{dV}{d\tau} = - \frac{dV}{\rho V dV} \cdot \frac{dp}{d\tau}.$$

После сокращений получаем

$$\frac{dV}{d\tau} = - \frac{1}{\rho V} \cdot \frac{dp}{d\tau}.$$

Второй член основного уравнения преобразуем следующим образом:

$$\mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} = - \mu \cdot \Delta V \cdot \frac{1}{\rho V} \cdot \frac{dp}{d\tau}$$

Используя условие несжимаемости, получим

$$\mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} = \mu \cdot \text{rotrot} V \cdot \frac{1}{\rho V} \cdot \frac{dp}{d\tau}, \text{ или}$$

$$\mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} = v \cdot \text{rotrot} V \cdot \frac{1}{V^2} \cdot \frac{dp}{d\tau}$$

Воспользовавшись теоремой 2, получим:

$$\mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} = v \cdot \frac{\omega^2}{V^2} \cdot \frac{dp}{d\tau},$$

и окончательно

$$\mu \cdot \Delta V \cdot \frac{dV}{d\tau} = \frac{v}{R^2} \cdot \frac{dp}{d\tau}$$

Здесь $v = \mu / \rho$, а $1/R$ - кривизна тракта.

Значение коэффициента при первой производной показывает меру демпфирования системы. В частности коэффициент динамической вязкости v характеризует демпфирование из-за трения. Кривизна, так или иначе, связана с градиентными характеристиками потока. Например, положительный градиент давления способен привести поток к отрыву и образовать дополнительное демпфирование.

Далее преобразуем третий член с целью выделения из него величины статического давления p :

$$\mu V \cdot \frac{d(\Delta V)}{d\tau} = v V \cdot \frac{\Delta \frac{dV}{d\tau}}{\left(\frac{\rho_0}{\rho} - \frac{V^2}{2}\right)}$$

Значение коэффициента при p характеризует упругость системы (упругость столба газа). Оно определяет частоту колебаний, в то время как коэффициент при первой производной определяет модуляцию колебаний.

Далее коэффициенты перед вторым и третьим членами уравнения обозначим функциями α и β , тогда

$$\frac{d^2 p}{d\tau^2} + \alpha \frac{dp}{d\tau} + \beta p = 0.$$

Мы получили главное колебательное уравнение. Это - нелинейное уравнение второго порядка и с его помощью можно получать любые решения уравнения Навье-Стокса. В соответствии с теоремой 1, это могут быть потенциальные, соленоидальные и торсионные решения. Нас из всех решений интересуют волновые, которые могут быть линейные (периодические) и нелинейные (в общем случае непериодические). Полученное уравнение позволяет определить не только частоту колебаний, но и амплитуду. В этом месте заметим, что понятие частоты справедливо только в случае периодических решений, так как частота отражает регулярную повторяемость процесса и выражается однозначно через период.

Для того чтобы из всех решений анализируемого уравнения выделить периодические, достаточно приравнять переменные коэффициенты α и β конкретным постоянным величинам, характеризующим, например, затухание колебаний и упругость системы. Другими словами, превратить уравнение в линейное. По аналогии с линейным осциллятором с трением оно будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d^2 p}{d\tau^2} + 2\delta \frac{dp}{d\tau} + \omega_0^2 p = 0,$$

а его решение:

$$p = p_{max} \cdot e^{-\delta\tau} \cos(\omega_0 \tau - \varphi).$$

Здесь p_{max} - амплитуда колебаний, ω_0 - собственная частота; φ - фаза колебаний.



Итальянский учёный
Луиджи Крокко



Российский учёный
Евгений Васильевич
Лебединский

Такое формальное приравнение преследует две цели:

1. Определить диапазоны периодических решений среди всей совокупности решений уравнения Навье-Стокса.
2. Получить ряд возможных собственных колебаний - мод колебаний.

В результате сделанного анализа проблему нелинейной неустойчивости можно сформулировать следующим образом.

В соответствии с главным колебательным уравнением необходимо определить диапазоны его периодических (гармонических) решений и определить моды (собственные частоты) колебаний системы с целью нахождения в последующем резонансных частот в соответствии с граничными условиями.

Другими словами, нормальная работа ЖРД исключает любые колебания, и появление гармонических колебаний является первой потерей устойчивости течения. Но переход к новому устойчивому состоянию, колебательному (вибрационному горению в соответствии с Б.В. Раушенбохом [5]), ещё не является началом неустойчивой работы камеры ЖРД. Начало неустойчивой работы произойдет только после второй потери устойчивости, когда частоты собственных колебаний совпадут с частотами, генерируемыми процессами, происходящими до зоны горения в области, непосредственно приближенной к форсуночной головке.

Об обратной связи в автоколебательном процессе

Анализируя виды неустойчивостей в ЖРД, исследователи пришли к выводу, что имеют место два характерных вида: низкочастотная неустойчивость (НЧ) и высокочастотная (ВЧ). В соответствии с [6] частоты в диапазоне 10...200 Гц (низкочастотная неустойчивость) возникают в результате взаимодействия процесса горения и системы подачи топлива. Высокочастотная неустойчивость (выше 1000 Гц, за исключением очень больших камер сгорания) ассоциируется с акустическими характеристиками объема камеры. Попробуем порассуждать дальше. Если считать, что низкочастотная неустойчивость возникает в результате неустойчивой работы устройства подачи, то очевидно главным колебательным контуром в автоколебательной системе является объем газов, сосредоточенный именно в этом устройстве. Другими словами, все элементы этого устройства, включая трубопроводы, и вплоть до области за форсуночной головкой являются тем колеблющимся столбом жидкости, который является источником будущих колебаний.

Аналогичная картина вырисовывается и с камерой сгорания. Здесь, как уже говорилось, колебательным звеном является столб газа, сосредоточенный собственно в камере и ограниченный зоной горения.

Обе эти системы объединяет зона горения. Что же она из себя представляет? Во-первых, до её левой границы поток сильно турбулизован и возможно - он двухфазный. Здесь сосредоточены крупномасштабные турбулентные образования в виде перемешанной смеси горючего и окислителя. Линии тока горючего, сильно перепутанные с линиями тока окислителя, представляют собой геометрическую структуру максимального контакта. Как известно из газовой динамики, линии тока пересекаются не могут. Так, например, в сверхзвуковых потоках это немедленно приводит к образованию ударных волн. А вот пересечение линий токов компонентов в зоне горения возможно. Оно приводит к образованию нового вещества - продукта сгорания. По месту контакта двух компонентов возникает химическое взаимодействие - горение, то есть преобразование исходных продуктов в стехиометрическом соотношении. Это преобразование осуществляется в строгом соответствии с Законом о валентности Франкленда-Кекуле (Эдуард Франкленд и Фридрих Август Кекуле). Оно (горение) происходит строго по месту контакта. В противном случае происходит недогорание и часть компонентов выступает в виде балласта, или в виде образований из низкокалорийных радикалов. В этом случае зона горения расширяется.

Правая граница зоны горения представляет собой ровную успокоенную массу продуктов сгорания, так как процесс горения снижает турбулентность. Следом за этой границей зарождается ламинарный поток продуктов, движущихся в сторону критического сечения сопла.

Размеры зоны горения в зависимости от качества смесеобразования могут быть различными. Если исходное соотношение компонентов соответствует стехиометрическому и поток хорошо подготовлен к горению (тщательно перемешан), то зона горения в идеальном случае превращается в поверхность горения. Поверхность горения формально разделяет камеру сгорания на две области. При этом общая проблема о неустойчивости ЖРД практически может быть разделена на две независимые проблемы: о низкочастотной неустойчивости и высокочастотной.

Прежде чем говорить о граничных условиях для каждой из этих областей, отметим, что для высокочастотной неустойчивости ранее в данной работе было получено главное уравнение для колебательного звена. Для низкочастотной неустойчивости специально получать это уравнение мы не будем, ограничиваясь следующими рассуждениями. Известно, что введение понятия времени запаздывания для описания низкочастотной неустойчивости сильно упрощает задачу. Такое введение лишает необходимости проводить сложные сопряженные расчеты по горению при нестационарной постановке. Но одного удобства недостаточно, чтобы охарактеризовать преимущества такого феноменологического подхода. Действительно, записывая результирующие соотношения по расходу как функцию, зависящую от координат со сдвигом аргумента, сразу замечаем, что подобного рода решение, в соответствии с методом Даламбера, предполагает в качестве исходного уравнения - волновое. Другими словами, если бы мы, решая задачу о низкочастотной неустойчивости, пришли к волновому уравнению, то, решив его методом Даламбера, получили то самое эмпирическое соотношение по расходам в виде функции со сдвигом аргумента на величину времени запаздывания. И, таким образом, для низкочастотной неустойчивости мы бы имели главное колебательное уравнение, соответствующее прямой связи в автоколебательной системе.

Для решения задачи неустойчивости и в том (НЧ) и другом (ВЧ) случае необходимо сформулировать граничные условия. Совместное рассмотрение НЧ и ВЧ показывает, что граничные условия следуют формировать из условий горения.

Поскольку нахождение этих условий является специальным исследованием, то предварительно в данной работе ограничимся

следующими предпосылками. Очевидно, что устойчивым горение будет только тогда, когда оно происходит в стехиометрическом режиме [2].

Очевидно, что в случае переобогащения смеси или наоборот, возникает неустойчивость формы поверхности горения и могут возникнуть предпосылки для вибрационного горения [5].

Очевидно, что устойчивость процесса горения зависит от отношения скорости химической реакции и скорости диффузии компонентов в зону горения, то есть от числа Дамкёллера (Da).

При формировании граничных условий полезно использовать зависимость скорости горения от числа Дамкёллера. Эта зависимость была получена в работе [7] для условий химического взаимодействия углерода с водородом и превращена в универсальную путем перехода к критериальной записи:

$$\frac{W}{W_k} = 0,4\bar{p} - 0,2 \ln Da.$$

Здесь W и W_k - скорость горения (искомая величина) и скорость химической реакции в кинетическом режиме [7]; \bar{p} - безразмерное давление.

Использование данной формулы удобно при нахождении гармонических зависимостей, связанных, например, с воздействием случайных возмущений на зону горения.

Приведенные зависимости позволяют получать необходимые параметры при проектировании перспективных ЖРД, исключая их неустойчивую работу. ▮

Литература

1. Е.В. Лебединский. Акустика газовых трактов жидкостных ракетных двигателей. М. Центр Келдыша, 2004 г.
2. Л.Крокко и Ч.Синь-И. Теория неустойчивости горения в жидкостных ракетных двигателях. М. Издательство иностранной литературы, 1958 г.
3. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Торсионно-волновая парадигма // Двигатель №4, 2011 г.
4. Кочетков Ю.М. Турбулентность, сжимаемость и вязкость // Двигатель №5, 2011 г.
5. Б.В. Раушенбах. Вибрационное горение. М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1961 г.
6. И. Тимнат. Ракетные двигатели на химическом топливе. М. Мир 1990 г.
7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность в СЭДУ. // "Двигатель" № 2, 2007 г.

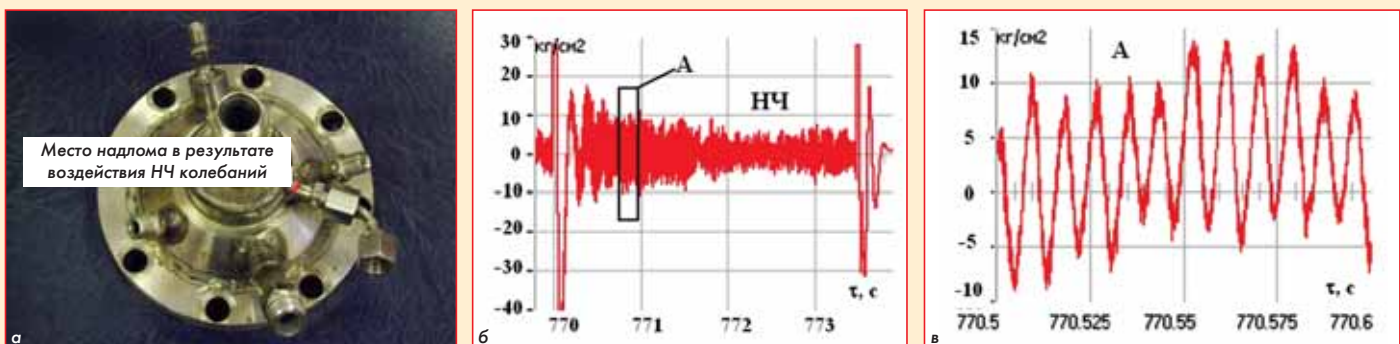


Рис. 1. Разрушение тракта подачи компонентов при воздействии НЧ-колебаний (а), осциллограмма НЧ-колебаний (б), растяжка участка осциллограммы (в)

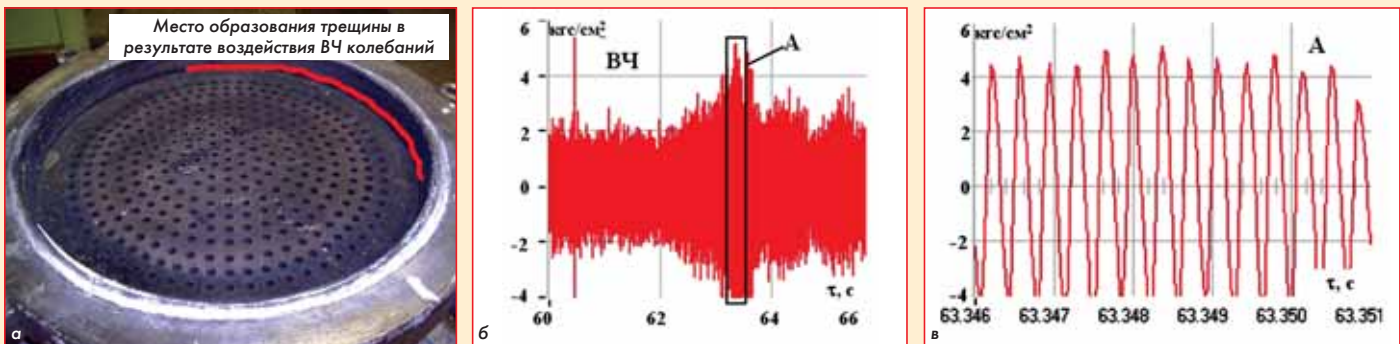


Рис. 2. Разрушение камеры при воздействии ВЧ-колебаний (а), осциллограмма ВЧ-колебаний (б), растяжка участка осциллограммы (в)