

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ. ВОЗНИКНОВЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ЖРД

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Причины, которые приводят к неустойчивой работе ЖРД, до сих пор обсуждаются. Существует порядка двадцати критериев перехода двигателя в область неустойчивой работы. Наиболее популярным и долговечным остается критерий Релея, который был получен на основании анализа фундаментальных экспериментов Рийке и Босша-Рисса на сквозной вертикально установленной трубе, внутри которой была нагретая до красна частая металлическая сетка. Интерпретация данных опытов различными авторами сводится к умоглядному заключению об определяющем влиянии скорости подводимого тепла посредством горячей сетки к столбу колеблющегося газа. Строгого теоретического объяснения этого факта нет. На базе торсионно-волновой парадигмы турбулентности возможно установить причины возникновения акустических колебаний, обозначить области устойчивости данного процесса и разработать теорию нелинейной неустойчивости ЖРД.

Несмотря на то, что явление неустойчивости ЖРД известно давно и ему посвящено большое количество работ, далеко не все вопросы теории этого явления разработаны. Общепринятым на сегодняшний день является факт существования неустойчивости при условии возникновения автоколебательного процесса по аналогии с процессами, происходящими в электрофизике в электронных лампах. Считается, что возникновение автоколебаний возможно при наличии трех элементов в замкнутой цепи. Это - колебательное звено (столб продуктов сгорания), источник энергии (зона горения), необходимый для подпитки колебаний и некий аппарат, дозирующий подвод энергии в систему и регулирующий ее поступление в необходимом количестве (нелинейность системы).

В книге Б.В. Раушенбаха [1] говорится, что основные теоретические выводы по теории неустойчивого горения сводятся к утверждению о том, что: 1 - частоты колебаний определяются акустическими свойствами системы; 2 - условия возбуждения сводятся к экспериментальному критерию Релея, 3 - из большого количества возможных механизмов обратной связи до сих пор достаточно подробно рассмотрен лишь, так называемый, механизм Крокко. Пессимистическая нота данной работы заставляет задуматься о завершенности исследований по данной проблеме. Причем один из разделов этой проблемы - причина возникновения неустойчивости, до сих пор является дискуссионным. А в фундаментальном издании [2] под редакцией Д.Т. Харрье и Р.Г. Рирдона, где авторами являются девяносто известных специалистов, констатируется, что "никогда не удастся разработать окончательную теорию неустойчивого горения в ЖРД". Такой научный истеблишмент не оставляет ничего другого как вновь обратиться к истокам данной проблемы.

Опыты Рийке и Босша-Рисса

Многие теоретические основы проблемы неустойчивости базируются на двух фундаментальных опытах: Рийке, со звучащей трубой при нагреве нижней зоны и Босша-Рисса - при охлаждении верхней зоны.

Первый опыт, поставленный Рийке [3], явился примером образования звука в результате нагревания. Он демонстрировал поразительное явление - звучание вертикально установленной трубы после подведения к ней тепловой энергии. Энергия поступала от нагретой до красна металлической плоской сетки с частой мелкой ячейкой в область с сечением, расположенным на расстоянии четверти длины трубы со стороны нижней части. Труба была расположена вертикально с целью организации конвективных потоков внутри нее. Сквозная тяга, возникающая в трубе, приводила к возникновению звука значительной силы. Рийке установил, что расположение нагретой сетки в любом другом месте, в нижнем или верхнем сечении не приводило к звучанию.

Явление, открытое Рийке, вдохновило многих ученых на исследование данного процесса. Через некоторое время естествоиспытателями Босша и Риссом было открыто еще одно явление, схожее по своей значимости с явлением Рийке. Они поставили аналогичный эксперимент на трубе, но сетку разместили на трех четвертях высоты трубы. При этом сетка не нагревалась, а наоборот охлаждалась. Потоки теплого воздуха поступали снизу от трубы и пересекали охлажденную сетку. Труба также звучала. Следует отметить, что в обоих опытах тепло либо подводилось к сетке, либо отводилось от нее. После опытов стало очевидно, что тепло является основным источником энергии, питающим колебательную систему.

Анализируя опыты Рийке и Босша-Рисса, Релей [4] впервые высказал предположение о возможности возбуждения акустических колебаний за счет энергии теплоподвода. Заранее предполагая периодичность поступления (отвода) тепла колеблющейся массе воздуха в трубе, Релей обращает внимание на фазу колебаний, при которой оно происходит. Так если теплота сообщается воздуху в момент наибольшего сжатия или отнимается от него в момент наибольшего разрежения, то колебания усиливаются. Напротив, если теплота подается в момент наибольшего разрежения воздуха, то колебания ослабляются. Результаты анализа экспериментов, проделанного Релеем, позволили ему сформулировать критерий возникновения колебаний: если между колебательной составляющей теплоподвода и колебательной составляющей давления фазовый сдвиг по абсолютному значению составляет величину менее чем $\pi/2$, в системе возбуждаются акустические колебания.



Филин Николай Александрович и Зенин Евгений Сергеевич - специалисты по проблемам акустики ЖРД - воспроизводят опыт Рийке

Условия возникновения периодических колебаний

Установление условий возникновения периодических колебаний в ЖРД является основным положением в теории нелинейной неустойчивости.

Границу перехода к состоянию колебательного движения установив математически, привлекая преобразованное уравнение Навье-Стокса и имеющее вид, представленный в работе [5]:

$$\frac{d^2\bar{p}}{d\tau^2} + 4\frac{v}{R^2}\frac{d\bar{p}}{d\tau} + 4\frac{v}{R^2} \cdot \kappa M^2 \frac{d\ln\frac{R}{\omega}}{d\tau} \bar{p} = 4\mu\omega^2 \frac{d\ln\frac{\omega}{R}}{d\tau}.$$

Уравнение записано относительно колебательной составляющей давления \bar{p} , представляющей в данном случае лишь аддитивную часть от статического давления. Другая часть этого давления для случая ЖРД предполагается величиной постоянной и входит в неявном виде в правую часть данного уравнения.

Если наперед предположить, что данное уравнение будет иметь среди прочих, в том числе и колебательные решения, то целесообразно обезразмерить время, деля реальное время на период собственных колебаний системы ω_0 : $\bar{\tau} = \tau/T = \tau \omega_0 / 2\pi$.

Тогда уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d^2\bar{p}}{d\bar{\tau}^2} + 8\frac{\pi v}{\omega_0 R^2} \frac{d\bar{p}}{d\bar{\tau}} + 8\frac{\pi v}{\omega_0 R^2} \cdot \kappa M^2 \frac{d\ln\frac{R}{\omega}}{d\bar{\tau}} \bar{p} = 8\pi \frac{\mu\omega^2}{\omega_0} \frac{d\ln\frac{\omega}{R}}{d\bar{\tau}}.$$

По аналогии с [5] введем критерии Ю.Л. Беренса и О.М. Меньшиковой, тогда:

$$\frac{d^2\bar{p}}{d\bar{\tau}^2} + 8\pi Ve \frac{d\bar{p}}{d\bar{\tau}} + 8\pi Ve \cdot Me^2 \cdot \bar{p} = 8\pi R\mu \frac{\omega}{\omega_0} \frac{d\ln\frac{\omega}{R}}{d\bar{\tau}}.$$

В этом уравнении полезно обратить внимание на отношение угловой скорости газового потока ω и угловой частоты собственных колебаний ω_0 . Это отношение ω/ω_0 характеризует периодичность двух процессов: газодинамического (турбулентного) и колебательного (волнового). Очевидно, это не случайно, поскольку причиной возникновения колебаний является турбулентный процесс.

Теперь перейдем к анализу данного уравнения. Его решение определяется характеристическим уравнением, записанным для дифференциального уравнения второго порядка без правой части и может быть представлено в виде:

$$x^2 + 8\pi Ve x + 8\pi Ve \cdot Me = 0.$$

Решением уравнения является выражение

$$x_{1,2} = \frac{-8\pi Ve \pm \sqrt{64\pi^2 Ve^2 - 32\pi Ve \cdot Me}}{2}.$$

В зависимости от знака дискриминанта дифференциальное уравнение может иметь решение либо апериодического типа, либо колебательного. В частности, если корни характеристического уравнения комплексные, то решение дифференциального уравнения без правой части имеет колебательный вид.

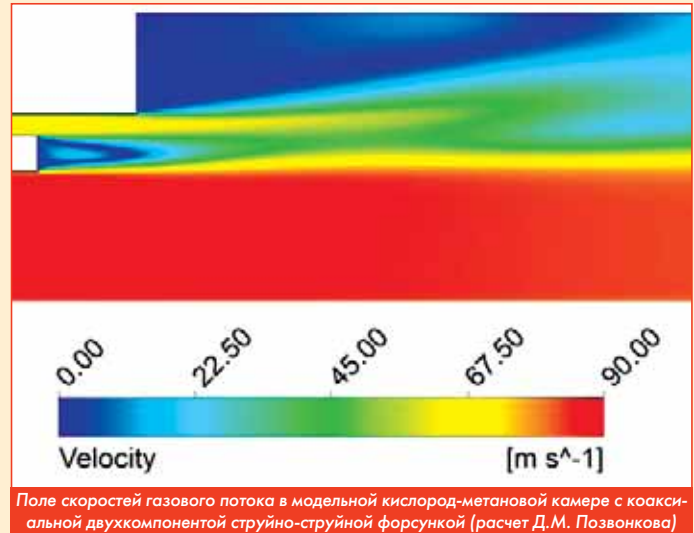
Далее определим границу, после которой возникают колебательные движения. Находим область комплексных значений по дискриминанту $64\pi^2 Ve^2 - 32\pi Ve \cdot Me < 0$, что соответствует $Me/Ve > 2\pi$.

Это неравенство является критерием возникновения неустойчивости в любой системе, в том числе и в ЖРД.

В отличие от экспериментального критерия Релея, сформированного на базе опытов Рийке и Босша-Рисса, полученное ограничение является теоретическим и имеет достаточно ясный физический смысл, заключающийся в том, что развитие колебаний в процессе работы двигателя может начаться при определенных газодинамических условиях, выражающихся через параметры турбулентности. Возникающие в процессе работы ЖРД турбулентные течения вдоль канала камеры порождают при определенных соотношениях элементарных движений периодический процесс, который переходит в колебательный.

Метод прогноза неустойчивости ЖРД

Полученное неравенство, характеризующее начало колебательного движения может служить основой при разработке метода расчета неустойчивых режимов ЖРД. Воспользуемся им и получим зависимости, которые возможно рассчитать, имея газодинамические



параметры. Для этого неравенство преобразуем с учетом следующих операций.

1. Раскроем критерии и логарифмическую производную в них.
2. Воспользуемся теоремой о соотношении элементарных движений и запишем обратную величину кручения через скорость и угловую скорость

$$1/\Omega = R/\omega = V/\omega^2.$$

3. Вернемся к реальному времени

$$\bar{\tau} = \tau \cdot \omega_0 / 2\pi.$$

После преобразований получим:

$$\frac{\kappa M^2 \cdot V}{v} \cdot \frac{d\ln\frac{V}{\omega^2}}{d\bar{\tau}} > 1.$$

Теперь, если выразить угловую скорость при помощи векторной операции ротор через скорость газового потока, то для определения комплекса в левой части становится достаточным знание только величины именно этой скорости, то есть скорости газовой среды в каждой точке рассматриваемой области:

$$\frac{\kappa \cdot V^3}{va^2} \cdot \frac{d\text{rot}^2 V}{d\bar{\tau}} > \frac{1}{4}.$$

Другими словами, если при помощи одной из известных программ по расчету газодинамических характеристик определить поле скоростей в любой точке камеры сгорания и со значениями этого поля рассчитать поле безразмерного параметра, расположенного в левой части последнего неравенства, то в соответствии с приведенным соотношением будет получена область неустойчивой работы ЖРД. Известно, что существует большое число лицензионных зарубежных и отечественных продуктов, которые можно использовать для расчета газовой динамики для самых различных конфигураций камер сгорания ЖРД и условий их работы.

На базе одного из методов в настоящее время разрабатывается специальная программа для расчета параметров, прогнозируемых неустойчивую работу камер ЖРД. Причем исходные данные, имеющиеся в электронном виде можно принимать в виде специального независимого файла. Расчеты по такой программе выявят зоны в ЖРД, по которым возможно будет судить о возникновении неустойчивости при работе реальных конструкций.


Следует отметить, что выбор граничных и начальных условий работы ЖРД является прерогативой программы-донора, поставляющей поле скоростей для последующих расчетов полей критериев неустойчивости.

Интерпретацию опытов Рийке и Босша-Рисса завершим, вновь перейдя к безразмерному времени и длине волны:

$$\frac{\kappa \cdot V^3}{va} \cdot \frac{d\ln\frac{V}{\text{rot}^2 V}}{d\bar{\tau}} > \frac{\lambda}{4}.$$

После чего, переписывая формулу через собственную частоту, получим:

$$\frac{\kappa \cdot \gamma^3 \omega_0}{\gamma \sigma^2} \cdot \frac{d \frac{\gamma}{\text{rot}^2 \gamma}}{d \bar{r}} > \frac{\pi}{2}.$$

То есть получено неравенство, удовлетворяющее условиям опыта Рijke. Если при сквозном обтекании воздухом внутренней части трубы Рijke возникает звук, то условие напрева стенки в нем соответствует одной четверти периода, то есть той пресловутой цифре, которая определяет критерий Релея. Далее, если учесть, что в опыте Рijke длина трубы соответствует длине волны, то мы опять получим магическое совпадение чисел ($\lambda/4$ - четверть трубы). Совпадение результатов опыта Рijke с теоретическими выкладками подтверждает правильность полученного критерия и целесообразность разработки программы. 

Литература

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1961.
2. Д.Т. Харрье, Ф.Г. Рирдон и др. Неустойчивость горения в ЖРД. М. Мир, 1975.
3. Rijke, Bosscha, Riess, Pogg. Ann., vol. CVII, 1859.
4. Релей. Теория звука, том 2, М. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.
5. Кочетков Ю.М. Турбулентность и АФЧХ // Двигатель №1, 2012.