

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС В ЖРД

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Турбулентность в камере ЖРД при определенных условиях может установиться таким образом, что формирующие ее солитоны будут представлять собой пространственные периодические структуры: вихри, торсионные жгуты, винтовые течения и прочее. Формирование периодических структур зависит от геометрических особенностей камеры сгорания. Это могут быть выступающие в поток форсунки, антиакустические кресты, естественные резонаторы в виде застойных зон, области смещения пристенных струй и т.д. С определенного момента пространственная периодичность может переходить во временную. При этом возникают колебания среды, а энергия вращательного, торсионного, винтового и прочего движения перекачивается в автоколебательную энергию и может привести к неустойчивой работе ЖРД. В данном случае автоколебания могут рассматриваться как акустические солитоны. При этом дисперсия автоколебательной системы конкурирует с нелинейностью процессов и достигается баланс этих понятий. После чего амплитуда и частота в сформировавшейся автоколебательной системе становятся неизменными.

Неустойчивость ЖРД связана с автоколебательными процессами, возникающими в продуктах сгорания камеры и в подводящих трубопроводах окислителя и горючего. Процесс возникновения таких колебаний связан с турбулентностью, которая зарождается при горении и истечении по каналам двигателя как компонентов, так и продуктов сгорания. В первом случае, когда причиной является турбулентность исходных компонентов горючего и окислителя, возможно возникновение низкочастотной неустойчивости. Турбулентность в этом случае "грубая" и крупномасштабная. Здесь решающим образом на ее возникновение влияют повороты, радиусы скругления конструкции, а также двухфазные эффекты: коагуляция, дробление, испарение и, наконец, горение. Масштабы турбулентности формируют периодические структуры, энергия которых переходит в низкочастотные колебания с частотой ~10 Гц.

В камере сгорания, сразу после зоны горения, формируются тонкодисперсные турбулентные структуры. Они определяются неравновесностями, оставшимися после сгорания компонентов, разностью параметров в процессах кинетики и диффузии (числами Дамкеллера) и конечно же конструктивными особенностями, включающими систему завесного охлаждения и трение. Такая турбулентность порождает высокие частоты ~1000 Гц и более.

И в том и в другом случае возникает автоколебания, то есть такой вид колебаний, который не предполагает внешнего периодического воздействия на систему. Последний случай называется вынужденными колебаниями и подробно рассмотрен в ряде работ. Автоколебания формируются в условиях нелинейных газодинамических течений. Это весьма устойчивые структуры, которые продолжительное время не затухают, а поддерживаются энергией из самой системы. В настоящее время автоколебания газодинамических систем, таких как ЖРД, находятся на самой ранней стадии изучения. Математический аппарат, разработанный по данной проблеме либо эмпирический, либо нелинейности, возникающая в системе, решается псевдолинейными методами Пуанкаре, Ляпунова и Ван-дер-Поля, где она предполагается или просто малой, или близкой к синусоидальной. В итоге задача все равно сводится к линейной, а общая проблема нелинейности остается без решения. В настоящее время перспективными считаются направления, связанные с разработкой методов обратной задачи рассеяния, с поисками преобразований типа Беклунда и конечно с широким использованием численных методов. Следует также отметить, что прежде чем решать (а точнее пытаться) нелинейные уравнения, целесообразно провести тест на соответствие возможному решению по теореме Ковалевской-Пенлеве [1, 2].

Автоколебания в ЖРД

Принятые на сегодняшний день формулировки, характеризующие автоколебания в системах двигательных и энергетических установок базируются на якобы заранее заложенных природой гармонических пульсациях давления. То есть утверждается, что в любой двигательной системе всегда имеется шум и давление пульсирует также всегда. Эти негармонические колебания (пульсации) возникают самопроизвольно и причиной этому могут служить, в том числе различные преобразования внутренней энергии исходных компонентов в тепло.

В действительности задачи возникновения пульсаций выглядят весьма разнородными, представляют многообразными по своей природе и не имеющими между собой ничего общего. Автоколебания рассматривались и рассматриваются в разных ипостасях. Например, наиболее яркая задача - это задача об автоколебаниях при горении топливной смеси в горле резонатора Гельмгольца. Актуальной автоколебательной задачей также является задача неустойчивости горения в ракетных двигателях.

Установлено для всех случаев, что автоколебания возникают при выполнении определенных условий, известных как условия неустойчивости. Они развиваются и поддерживаются без внешнего гармонического управления. Установлено также, что в одних случаях малые колебания начинают практически с нулевых амплитуд (мягкий режим самовозбуждения), в других - требуется начальный амплитудный толчок (жесткий режим).

Во многих книгах констатируется, что амплитуда установившихся автоколебаний имеет конечную величину и определяется главным образом нелинейностью параметров системы, а частота - параметрами входящего в систему частотно-избирательного элемента, чаще всего - резонатора. В книге [3] говорится, что автоколебательный режим занимает некоторое промежуточное положение между стационарностью и катастрофой. Так, например, в физике горения это: стационарное горение - вибрационное горение - взрыв.

Не вызывает сомнений, что наибольшие успехи в исследовании и использовании автоколебательных процессов и устройств достигнуты в области электроники. Приблизительно на том же уровне находится представление об автоколебаниях в области систем управления. Очень большой объем теоретических и экспериментальных работ выполнен при изучении термоакустической неустойчивости горения топливных систем. Предложено и циркулирует в литературе порядка двух десятков так называемых "механизмов неустойчивости" горения. Все они, как правило, умозрительные и не подкреплены достаточно строгими теориями.



Джон Скотт Рассел, шотландский естествоиспытатель, первооткрыватель солитонов
 Софья Васильевна Ковалевская, великий русский математик
 Поль Пенлеве, известный французский математик
 Михаил Львович Филимонов, российский газодинамик и математик-программист

Как показывают исследования в области электроники, в которой автоколебательные процессы наиболее хорошо изучены, типичный автогенератор гармонических колебаний должен содержать: источник энергии, усилитель возмущений, охваченный обратной связью и частотно-избирательный элемент. Переводя на язык газодинамики необходимо иметь: колебательный контур, устройство подпитки системы энергией и перепускной клапан.

Многие исследователи, принимая данную модель, тем не менее считают, что процесс автоколебаний в таком газодинамическом контуре может наступить случайно, совершенно неожиданно, а условия возникновения автоколебаний совершенно не предсказуемы. Различные авторы говорят, что автоколебания могут возникнуть от множества причин (как уже говорилось, в книге [3] приводится двадцать причин возникновения автоколебаний). На самом деле причина всегда одна. Просто авторы о ней пока не знают.

Суммируя сказанное выше можно констатировать, что автоколебания - это такие гармонические колебания, при которых за счет некоторой диссипации (дисперсии) происходит падение амплитуды с течением времени за счет расходования диссипативной энергии, но это падение компенсируется в связи с работой внутри системы аппарата нелинейности, который восстанавливает амплитуду и частоту до начального положения. Конкуренция дисперсии в колебательном контуре и нелинейности приводит к возникновению автоколебаний.

Экспериментально установлено, что автоколебания могут возникать при самых различных ситуациях. Например, в трубах могут быть возбуждены мощные автоколебания воздушного столба, музыкальные инструменты, построенные на принципе движения звуковых волн вдоль труб могут иметь различные инициаторы звуковых волн (автоколебаний).

Духовые инструменты делятся на язычковые (кларнет, гобой, саксофон и др.) и мундштуковые (труба, тромбон и др.). В последнем возбудителем являются губы музыканта, вдавливаемые в чашечку мундштука и работающие на манер голосовых связок. В язычковых инструментах автоколебания имеют частоту, колеблющегося язычка.

Термоакустические трубы (трубы Рийке) работают на том же принципе, только колебания совершает нагретая сетка.

Замечательным способом издавания красивых звуков является использование так называемых эоловых арф, представляющих собой рамки с настроенными в унисон струнами, установленных на открытом воздухе и издающих под влиянием ветра слабый мелодичный звук. Струхалем было обнаружено, что частота звука прямо пропорциональна скорости потока и обратно пропорциональна диаметру струны. Кроме эоловых тонов давно уже наблюдались так называемые гуслевые и кленовые тоны. Часто образование перечисленных выше звуковых эффектов идентифицируют с возникновением вихрей за плохо обтекаемыми телами. Особенности турбулентного течения такие как срывающиеся вихри, кручение потока и прочее являются причиной возникновения периодических течений, которые в последующем могут переходить в колебательные движения.

Таким образом, возникновение периодических временных структур связано с турбулентностью в конструкциях.

Солитоны - причина возникновения периодических турбулентных структур

Любая пространственная структура потока может считаться турбулентной. Она способна приводить к появлению, так называемых традиционно, пульсаций. Это могут быть пульсации давления, скорости, плотности, температуры и прочее. Пульсации в течениях - всегда вторичные понятия. Это результат воздействия на ближайшую элементарную массу части импульса от поступательного, волнового, вращательного или торсионного потока. Поэтому понятие пульсация имеет категорию случайности как по координате, так и по времени. В связи с чем, она (пульсация) никогда не будет первопричиной. Это - лишь частный параметр, сильно ограниченный своими возможностями.

Феноменологическое фундаментальное газодинамическое уравнение Навье-Стокса ни в одном своем члене не содержит даже намек на пульсацию, хотя оно абсолютно полно и подробно описывает все формы движения, в том числе и турбулентные. Переходя к анализу уравнения Навье-Стокса всегда хочется обратить внимание на то, что оно нелинейное и, как говорят многие книги, аналитически не решается. Не вдаваясь в дискуссию с подобными авторами скажем так, что пока не решаются, потому что они этого делать не умеют. В данной статье не будет попытки решить уравнение Навье-Стокса. Некоторые преобразования уже изложены в предыдущих работах. Будут рассмотрены возможности локализованных решений данного уравнения, а именно солитонов. Эти решения будут полезны в дальнейшем для вывода условий возникновения автоколебательных процессов. Итак, уравнение Навье-Стокса (векторное) содержит нелинейный член в виде конвективной составляющей. Например, в проекции на ось x ее можно записать как произведение $v_x \cdot (\partial v_x / \partial x)$. Отбросив этот член, что часто делают аспиранты и студенты МФТИ, можно получить линейное уравнение, которое в общем-то и решать не надо. Его уже решили. А вот если этот член не отбрасывать, то его наличие может привести к образованию локализованных решений - солитонов. Впервые солитон физически наблюдал замечательный шотландский инженер Джон Скотт Рассел. При жизни он был затерт "авторитетами" от науки и умер в одиночестве без соответствующих почестей и регалий. Сегодня его имя с трепетом и благодарностью вспоминается учеными из многих направлений науки и техники, где были открыты солитоны: в гидродинамике, электрофизике, оптике, нейрохирургии, химии, небесной механике и др.

В последующем очень подробно о солитонах было написано во многих книгах и статьях. Одна из наиболее эмоциональных, простых и понятных в изложении является монография А.Т. Филиппова [4].

Образование солитона возможно только в одном случае, когда уравниваются два фундаментальных понятия в волновой физике. Это - дисперсия и нелинейность. Если о дисперсии много написано и мы привыкли воспринимать ее как свойство, которое приводит к расплыванию стоячей волны, ее растягиванию по оси, превращая зачастую из пикообразной в волну с малой амплитудой и длинными ниспадающими полками, то нелинейность первоначально понятие математическое. Подробное исследование нелинейных коэффициентов в дифференциальных уравнениях показало, что наличие их в любой форме, так называемая сильная нелинейность или слабая, расположение этих коэффициентов в уравнении, их пересечения и т.д. могут приводить к различным физическим эффектам. Так, например, нелинейные коэффициенты приводят к тому, что стоячая волна может собираться, локализоваться и превращаться в градиентную, подобно градиентному волнам Кельвина-Гельмгольца, форма которых зависит от амплитуды.

В итоге получается, что два отмеченных эффекта, связанные с дисперсией и нелинейностью, действуют в разных направлениях. Их уравнивание приводит к образованию так называемых уединенных волн (по Дж. Ск. Расселу) или к солитонам, которые так были названы в 1965 г. двумя американскими учеными М. Крускалом и Н. Забуски. По свидетельству А.Т. Филиппова, солитон находится между Сциллой нелинейности и Харибдой дисперсии, и может образовываться, когда уравниваются эффекты нелинейности, делающие холмик более крутым и стремящиеся опрокинуть его, и эффекты дисперсии, делающие его более пологим и стремящиеся размыть его.

Известные эффекты, присутствующие в турбулентных течениях, а именно такие устойчивые состояния потока, как волны Толмина-Шлихтинга, градиентные волны Кельвина-Гельмгольца, вихри Тейлора-Гертлера, устойчивые парные жгуты и др., являются именно солитонами. Возникновению этих устойчивых турбулентных образований предшествуют причины образования солитонов, а именно: дисперсия и нелинейность. Наличие солитонов способствует возникновению периодических течений, связанных с пространственной характеристикой, а именно с длиной волны λ . Эта пространственная периодичность связана с временной периодичностью простыми соотношениями $a = \lambda/T$ и $\omega_0 = 2\pi/T$ и должна рассматриваться неразрывно. Простым примером служит воздействие на скорость оператора rot или $\text{rot} \text{rot}$. В этом случае непериодическая функция скорость после воздействия на нее этих операторов становится периодической.

Важным обстоятельством становится то, что периодические процессы, если они возникли, естественно сохраняются и могут переходить из одной формы в другую. Например периодического вращательного процесса может перекачиваться в энергию колебательного процесса. С математической точки зрения здесь тоже все понятно.

Достаточно упомянуть, что и в физике и в математике существует понятие частота и круговая частота.

Возникновение автоколебаний. Необходимые и достаточные условия (теорема)

Из предыдущего анализа следует, что если в ЖРД содержатся как обычно помимо цилиндрической камеры все необходимые атрибуты: форсунки, зоны завесного охлаждения, противоакустические кресты, резонаторы и т.п., то возникает турбулентный поток. Если в этом потоке реализуются условия дисперсии и нелинейности, то возможно возникновение особых устойчивых образований - солитонов, которые приведут к появлению периодических структур: вихрям, торсионным жгутам, винтовым течениям и т.д. Появление периодических течений может явиться причиной автоколебаний, так как автоколебательный процесс по существу является временным или акустическим солитоном.

Рассмотрим с математической точки зрения условия, когда может появиться автоколебательный процесс. Для этого нужно соблюдение двух условий необходимого и достаточного. Необходимым условием будет наличие колебания газового столба. Достаточным условием - сохранение амплитуды и частоты в процессе всего времени существования автоколебательного режима.

Необходимое условие.

В соответствии с [5] колебательные движения газа в камере ЖРД возникнут и будут существовать при условии выполнения следующего неравенства $\Phi Z > 1/4$, где ΦZ - критерий Филина-Зенина, представляющий собой комбинацию, составленную на базе известных параметров поля абсолютных скоростей в камере

$$\Phi Z = \frac{\kappa V^3}{\nu a^2} \cdot \frac{d}{d\tau} \frac{V}{\text{rot}^2 V} = \frac{\kappa V^4}{\nu a^2} \cdot \frac{d}{dr} \frac{V}{\text{rot}^2 V}$$

Здесь κ , ν и a - показатель адиабаты Пуассона, кинематическая вязкость и местная скорость звука.

В решениях уравнения главного колебательного звена в автоколебательной системе будут присутствовать синусоидальные функции, содержащие модулирующий множитель и члены, зависящие от граничных условий. Решения могут быть как затухающие, так и возрастающие по амплитуде.

Достаточное условие.

Чтобы сформировать достаточное условие существования автоколебаний следует записать главное дифференциальное уравнение колебательного звена в виде [5]

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

Очевидно, что автоколебания возникнут в случае равенства дисперсного и нелинейного членов. То есть необходимо приравнять второй член в левой части уравнения и член в правой части, тогда

$$\frac{1}{R^2} d\tilde{p} = \rho \omega^2 d \ln \frac{\omega}{R}$$

После преобразований последнее уравнение запишется в виде

$$d \ln \frac{\rho v^2}{2} = 2 d \ln \frac{R}{\omega}$$

После интегрирования получаем зависимость

$$\ln \frac{\rho v^2}{2} - \ln \left(\frac{R}{\omega} \right)^2 + c = 0,$$

где c - постоянная интегрирования.

После очевидного преобразования и потенцирования членов, получаем $\rho \omega^4 = \text{const}$.

Последнее уравнение является достаточным условием существования автоколебаний. ▲

Литература

1. Городцов В.А. Софья Ковалевская, Поль Пенлеве и интегрируемость нелинейных уравнений сплошных сред. М. Физматлит, 2003.
2. Филимонов М.Л. Монотонная разностная схема для решения задач газовой динамики. М. ГОНТИ-8, 1970.
3. Гладышев В.Н. Автоколебания при горении и термоядерных взаимодействиях. Новосибирск НИЦ ОИ ГГМ СО РАН, 1999.
4. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. М. Наука, 1986.
5. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Возникновение неустойчивости в ЖРД. // Двигатель №2, 2012.



Для борьбы с ВЧ-колебаниями создателям ЖРД приходится искать конструктивные решения, одним из которых стал "крест Исаева"