

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ. ГИДРОУДАР В ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*Проектирование, производство и надежная эксплуатация жидкостного ракетного двигателя невозможны без детального теоретического изучения протекания рабочих процессов в узлах и агрегатах пневмогидравлической системы (ПГС) и двигательной установки в целом. Такое исследование предполагает создание математической модели и на ее базе программного продукта, адекватно отображающего процессы в двигательной установке в период маршевой эксплуатации на номинальных и переходных режимах. Важным аспектом при создании такой программы является учет особенностей турбулентного течения в каналах запорно-отсечной арматуры и условий возникновения феномена гидроудара, которые определяют динамику ПГС.*

В настоящее время известно два вида программ для моделирования процессов ЖРД: статические и динамические. Динамические программы составляются с учетом возникающих в процессе работы ускорений. Наличие динамических аспектов, то есть присутствие инерционного члена в уравнениях движения, может приводить к различным аperiodическим переходным и колебательным процессам. При этом в качестве динамического параметра системы может проявляться частота колебаний. Процесс анализа таких систем основан на анализе амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) системы. Современные мировые тенденции свидетельствуют об увеличении объема работ по математическому моделированию процессов в ЖРД и созданию на их основе мощных программ для ЭВМ. Интенсивные разработки подобных продуктов ведутся более чем в десяти странах-разработчиках космических систем, то есть там, где проводятся работы по проектированию и экспериментальной отработке жидкостных ракетных двигателей.

В России активно ведутся работы по созданию таких программ. В Центре Келдыша разработана и прошла глубокую верификацию программа "Анасин" [1]. Программа основана на ста-

тической модели и в настоящее время проводится ее адаптация к динамическим условиям.

### Анализ динамических ситуаций в ПГС

ПГС современного двигателя (рис. 1 и 3) включает в себя следующие основные агрегаты и системы: камера, система зажигания, система подачи компонентов топлива, система регулирования, система управления, система наддува баков. Обобщенно, ПГС состоит из функциональных элементов: камеры и газогенератора, ТНА и баково-баллонной системы. Кроме того, для обеспечения функционирования этих элементов используется запорно-отсечная арматура (агрегаты автоматики). Все элементы ПГС соединены трубопроводами. К агрегатам автоматики относятся клапаны, дроссели, редукторы и регуляторы расхода.

Если проанализировать все перечисленные виды запорно-отсечной арматуры, то можно понять, что с математической точки зрения они все представляют собой некие клапаны с полной или неполной отсечкой или открытием проходных сечений тракта. Регулятор расхода от других агрегатов отличается тем, что имеющаяся в его конструкции пружина смягчает процесс открытия-отсечки. Анализ динамических ситуаций в ПГС ЖРД показывает, что их возникновения возможно в следующих пяти случаях. Это: запуск двигателя, останов двигателя, переключки - переход с одного режима на другой, неустойчивость камеры, развитие нештатных ситуаций. К тому же: возникновение кавитации, вопрос об одновременном параллельном или последовательном воздействии на систему перечисленных локальных причин и вопрос закономерности и случайности нештатных ситуаций.

Под динамикой будем понимать такое движение рабочей среды, которое имеет ускорение, а значит возможность возникновения колебаний. Аperiodические движения при переходных процессах будем причислять к статическим режимам. При этом очевидно, что в поле зрения попадут ситуации, когда двигатель выходит на режим (запуск), в том числе и переключки (только область подъема кривой давления), неустойчивость работы ЖРД (низкочастотная и высокочастотная) и кавитация. Развитие нештатных ситуаций следует учитывать дополнительным наложением

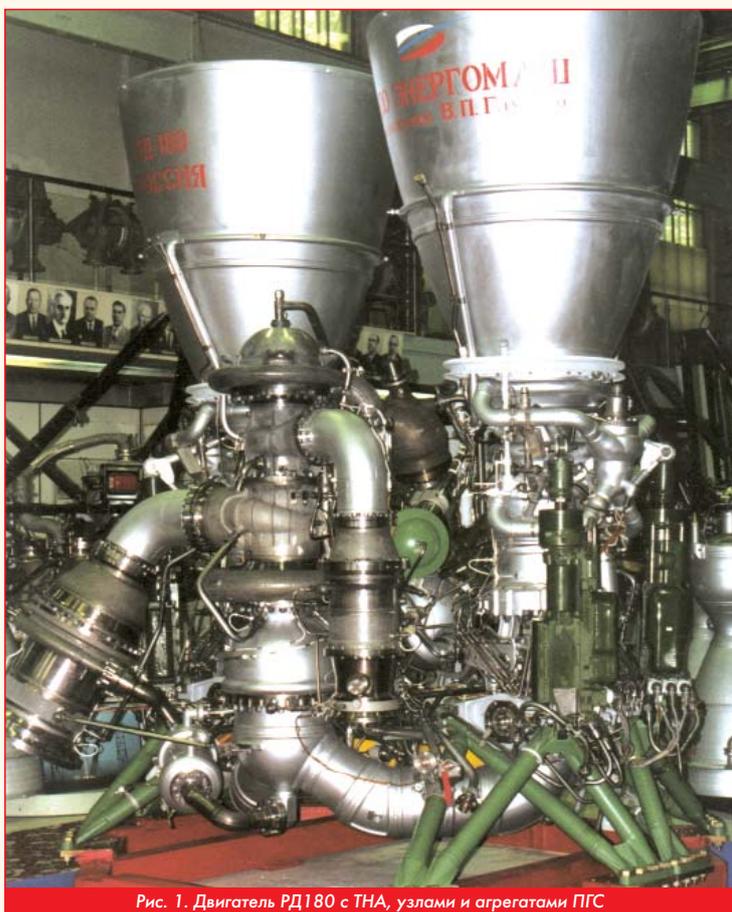


Рис. 1. Двигатель РД180 с ТНА, узлами и агрегатами ПГС



Рис. 2. Ротор ТНА современного ЖРД

на систему условий по режимам работоспособности (например, границы локальной турбулентности). Случайные воздействия на систему, возникшие при нарушении технологии изготовления отдельных узлов и прочее, остается записать в отказ и пополнить статистику по надежности. Причина возникновения "динамики", связанная с опорожнением двигателя (выброс остатков) и правая ниспадающая часть осциллограммы давления в перекладке, также неинтересны с точки зрения динамического режима. Эти случаи связаны со снижением расхода, а значит, на этих участках реализуется отрицательный градиент давления, приводящий к упрощению турбулентности и ламинизации. Это значит, что такие сложные циклические формы турбулентности как вихрь или торсионный жгут будут пропадать из потока.

Итак, проявляются три возможности возникновения динамических режимов работы ЖРД:

- неустойчивость в камере сгорания после воздействия мягкого и тем более жесткого возбуждения;
- возникновения колебаний вблизи элементов запорно-отсечной арматуры после их срабатывания;
- неустойчивость при возникновении кавитации.

Если считать возникающие автоколебания в кавитирующих насосах разновидностью автоколебаний в камере сгорания, то их можно отнести к первому случаю. И тогда остается две причины, приводящие двигательную установку к динамическому режиму.

Это, во-первых, воздействие мягким возбуждением на неустойчивую систему и приведение её к условиям автоколебаний (неустойчивости) и, во-вторых, воздействие жестким возбуждением на устойчивую систему, которая вначале воспримет провоцирующие колебания, а затем их "задушит".

Действительно, если газодинамическая система, такая как камера или шнековый насос (рис. 2), спроектированы так, что будут работать неустойчиво в силу их конструкционных и эксплуатационных особенностей, то всегда, даже от так называемого мягкого возбуждения, она будет выходить на динамический режим. При такой ситуации возникнут автоколебания и система может разрушиться.

Если на устойчивую систему (отрезок трубопровода, бак или другой элемент ПГС) воздействовать жестким возбуждением, например гидроударом, который может возникнуть при закрытии (открытии) клапана и любого другого агрегата автоматики, то возникшие колебания среды внутри системы с течением времени затухнут. Динамический процесс в отличие от автоколебаний завершится и система придет к ситуации, когда режим будет устойчив.

Следует уточнить, что же такое мягкое и жесткое возбуждение. Понятно, что жесткое возбуждение - это процесс наложения скачкообразных мощных связей (усилий) на систему. Это - гидроудар. Если наложение связей плавное и слабое, то оно считается мягким (гидромассаж).

### Прогноз режимов неустойчивости ЖРД

Прогноз режимов неустойчивости ЖРД построен на решении феноменологического уравнения Навье-Стокса [2]. Уравнение было преобразовано к виду амплитудной функции давления и представлено как главное уравнение колебательного звена

$$\frac{d^2\bar{p}}{d\tau^2} + 2\delta \cdot \frac{d\bar{p}}{d\tau} + \omega_0^2\bar{p} = -\omega_0^2 p_k.$$

Были получены критерии наступления автоколебаний и доказана теорема о возникновении неустойчивости в каждой конкретной точке пространства. С помощью этой теоремы возможно выделение областей в тракте, где поток неустойчив. Очевидно, что этих областей может быть конечное число и их суммарное воздействие на любой устойчивый участок камеры сгорания, где условия автоколебаний не выполняются можно определить как некоторую векторную сумму для амплитуд. Неустойчивые области являются источниками акустических излучений и они подобно музыкальным колонкам воздействуют на любую точку внутри камеры. В работе [3] показано, что система в такой ситуации способна синхронизироваться и сформировать общую частоту и фазу колебаний, двигаясь в одном синх-

ронном ритме. Была найдена генеральная последовательность синхронных частот (Слесарева-Тарарышкина), при которых может установиться этот ритм.

С точки зрения пневмогидравлической системы неустойчивость это один из динамических режимов ее работы. Появление неустойчивости в камере практически всегда ведет к сбою работы всей двигательной установки. Частое появление такой неустойчивости приводит к аварийным ситуациям. Учитывая сложность конструкции камеры сгорания ЖРД, особенности смесеобразования и охлаждения стенок, определение статуса устойчивой к ВЧ-колебаниям конструкции, отработку камеры целесообразно проводить автономно от ПГС. Аналитический прогноз также следует делать отдельно от ПГС, так как колебательная система формируется процессами в камере. Для прогноза неустойчивых ситуаций необходимо рассчитать газовую динамику камеры и определить собственные частоты колебательной системы. Далее по критерию Филина-Зенина определить области неустойчивости, а затем в соответствии с последовательностью Слесарева-Тарарышкина определить синхронную частоту, характеризующую неустойчивый процесс.

### Динамика запорно-отсечной арматуры

Как уже было сказано, к запорно-отсечной арматуре относятся элементы ПГС, с помощью которых плавно или скачкообразно гидравлические системы переходят с одного на другой режим. Если переход плавный, то, как правило, он - аperiodический. Если он скачкообразный, то в системе возникают колебания. Этот последний режим является основным при изучении динамики системы.

Скачкообразный переход на другой режим сопровождается явлением гидроудара. Это - фундаментальное явление в гидродинамике, которое характеризуется резким наложением связей на гидросистему и приводит к появлению ударной волны и следующему за ней каскаду отраженных волн. Гидроударом весьма фундаментально занимался знаменитый русский ученый Н.Е. Жуковский. В конце 19-го века Жуковский исследовал причины возникновения аварий в московском водопроводе [4]. На собрании им Политехническом обществе, он сделал доклад об открытом им новом явлении гидравлического удара. Вскрыв его механизм, он вывел формулу для расчета амплитуды ударной волны и скорости звука жидкости в трубах с податливыми стенками. Упоминание имени Жуковского нельзя не отметить его величайшие заслуги в области авиации. Он - родоначальник авиационной науки или как про него говорят, "отец русской авиации". Николай Егорович Жуковский доказал фундаментальную теорему о подъемной силе крыла, носящую его имя; определил основные профили крыльев и лопастей винта самолета; разработал вихревую теорию винта.

По литературе, посвященной исследованиям гидроудара, можно отметить, что во всех выпущенных в свет монографиях на тему о гидроударе упоминаются результаты его исследований. За последние сто лет теория гидроудара и сопутствующая ей теория

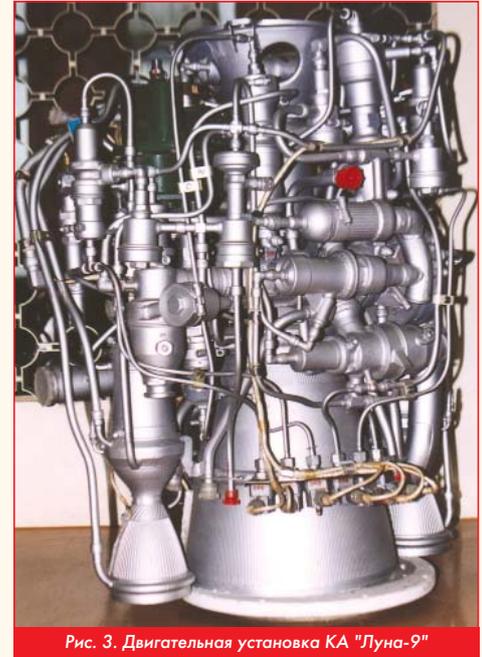


Рис. 3. Двигательная установка КА "Луна-9"



Н.Е. Жуковский

течений в сложных разветвленных трубопроводах продвинулись весьма серьезно. Особенно надо отметить существенное продвижение в части использования расчетных методов.

Один из популяризаторов этого способа исследования физических задач в данном направлении - наш современник, Виктор Александрович Федотчев. В.А. Федотчев - замечательный русский ученый, кандидат технических наук, специалист по проблемам прочности ТНА ЖРД. Он - автор нового класса высоконапорных оседиагональных насосов, оптимальных для ЖРД. На базе сделанных им разработок, он доказал целесообразность модернизации основных кислородных насосов для двигателей с тягой 100 и 1000 кН,

работающих на топливе кислород-керосин. Впервые под его научным руководством был спроектирован одноступенчатый оседиагональный насос на кислороде с напором 30 МПа с антикавитационными свойствами. Свои разработки Виктор Александрович проводил и проводит с использованием современных методов оптимального проектирования и комплексного исследования параметров элементов ТНА. Еще в шестидесятых годах прошлого столетия, когда в ракетную технику только вводились новые методы расчета с использованием ЭВМ, им впервые в отечественной ракетной отрасли был внедрен математический метод конечных элементов, на основе которого также впервые была разработана методика и решена связанная задача гидромеханики и упругости для сложных пневмогидравлических систем ЖРД. Он - автор программно-методического обеспечения для комплексного исследования и оптимального проектирования колес оседиагональных насосов ЖРД. Является одним из авторов известного в России и за рубежом универсального программного продукта (АНАСИН) для математического моделирования процессов в ДУ ЖРД.

В эпоху создания первых ракетносителей многие расчетные методы (в силу специфики данного направления) разрабатывались с учетом будущих практических приложений к инженерным задачам. Большое количество методик было создано на базе имеющихся эмпирических результатов, полученных в процессе испытаний ЖРД. К сожалению, в настоящее время динамика данного процесса исследована не в достаточной степени. В основном, разработанные методики позволяют определить интегральные величины и амплитудные усилия. Методы, как правило, разрабатывались применительно к невязкой, одномерной среде. Поэтому, наряду с неоспоримо важными для практики того времени результатами, все-таки требуется для тонкого теоретического анализа разработка точных методов, основанных на полных уравнениях Навье-Стокса. К решению задачи о гидроударе продуктов сгорания в полостях арматуры ПГС повторно привлечем уравнение Навье-Стокса, записанное в скалярной форме применительно к динамической задаче

$$\frac{d^2\bar{p}}{d\tau^2} + 2\delta \cdot \frac{d\bar{p}}{d\tau} + \omega_0^2 \bar{p} = -\omega_0^2 p_0.$$

Вынуждающая сила справа с учетом гидроудара будет задаваться ступенчатой функцией и при  $\tau > 0$ , она будет величиной постоянной.

Из теории линейных дифференциальных уравнений известно, что общим их решением будет алгебраическая сумма соответствующего однородного уравнения и любого частного решения неоднородного уравнения. Путем прямой подстановки частного решения в виде

$$\xi = \frac{(-\omega_0^2 p_0)}{\omega_0^2}$$

убеждаемся, что дифференциальное уравнение превращается в тождество.

Тогда общее решение неоднородного уравнения записываем в виде:

$$\bar{p} = Ae^{-\delta\tau} \sin(\omega_0 \tau + \varphi) + p_0.$$

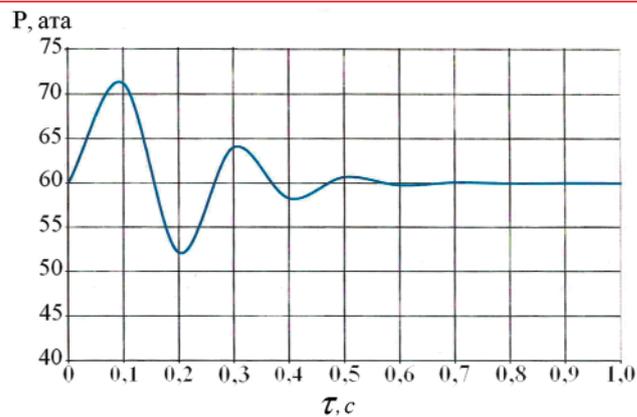


Рис. 4. Аналитическое решение задачи о гидроударе в ПГС

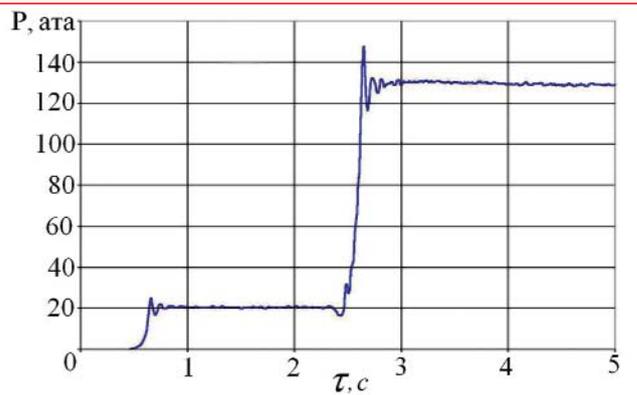


Рис. 5. Двойное включение камеры ЖРД

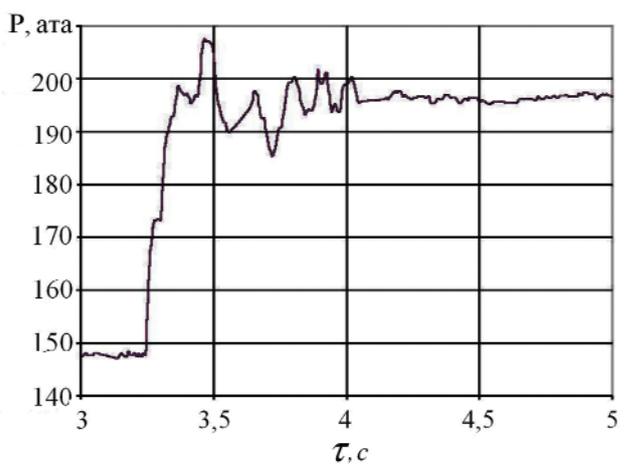


Рис. 6. Открытие клапана окислителя

С учетом начальных условий определяются значения амплитуды и фазы колебаний. Решение  $\bar{p}(\tau)$  имеет характерный вид с затухающей амплитудой (рис. 4). Асимптотой в данном случае является горизонтальная прямая  $p_0(\tau) = \text{const}$ . Подобные кривые встречаются во многих случаях переходных процессов в динамических системах. Например, на рис. 5 и 6 показан выход ЖРД на номинальный режим и открытие клапана в ПГС ЖРД. **□**

**Литература**

1. Е.В. Лебединский, С.В. Мосолов, Е.С. Зенин, В.И. Тарарышкин, В.А. Федотчев. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей. М. Машиностроение, 2009 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Возникновение неустойчивости в ЖРД. // Двигатель. № 2, 2012 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Генеральная последовательность синхронных частот. // Двигатель. № 1, 2013 г.
4. Н.Е. Жуковский. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М-Л. изд. технико-теоретической литературы, 1949 г.