

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СОВРЕМЕННЫХ ЖРД

Сегодня трудно представить цивилизованный мир без ракетно-космической техники. Создана международная обитаемая космическая станция. Продолжаются полеты к дальним планетам Солнечной системы. Реализуются программы по выводу на различные орбиты сотен спутников с целью всемирной информатизации (телефонизации, мониторинга, обмена информацией, обучения, проведения банковских операций, слежения за транспортом, быстрого обнаружения чрезвычайных ситуаций и решения большого количества других задач).

Все виды полезных нагрузок должны выводиться в космос ракетами-носителями (РН), оснащенными высокоэффективными, надежными, дешевыми и экологически чистыми двигателями. Этим требованиям отвечают ракетные двигатели, работающие на жидком кислороде и углеводородном горючем на первых ступенях РН и жидком кислороде и жидком водороде на верхних ступенях РН.

ОАО "НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко":

Борис Каторгин, член-корреспондент РАН, д.т.н., **Владимир Чванов**, д.т.н., **Евгений Беляев**, к.т.н.

МАИ:

Валерий Черваков, к.т.н.

К современным ЖРД предъявляют требования высокой надежности, экономичности работы, многократности запуска, многократности использования и т.п. Оптимизация полетных траекторий РН требует от ЖРД обеспечения широкого диапазона регулирования тяги двигателя при различных скоростях ее изменения. На рис. 1 приведен один из полетных профилей изменения тяги двигателя современной РН.

Стоимость разработки и эксплуатации современных ЖРД, их надежность и эффективность определяются многими факторами. Одним из важнейших факторов является знание и умение анализировать и управлять динамическими процессами, происходящими в узлах и агрегатах двигателя при его функционировании на протяжении всего полета.

Это стало возможным благодаря накопленному опыту разработки ЖРД, бурному развитию вычислительной техники и разработке методов математического моделирования.

Математическое моделирование призвано выявить характерные особенности функционирования и выбрать оптимальные статические и динамические характеристики узлов и агрегатов двигателя на основе глубокого теоретического анализа создаваемой конструкции и процессов, происходящих как в агрегатах, так и в двигате-

ле в целом. С помощью математического моделирования задолго до создания реальных узлов, агрегатов и двигателя в целом удается заглянуть в будущее создаваемого ЖРД, "прочувствовать" особенности его работы. Математическое моделирование должно сопровождать весь "жизненный цикл" существования двигателя, начиная с этапа технического предложения и эскизного проектирования, его экспериментальной отработки и заканчивая прекращением серийного производства. На этапе технического предложения и эскизного проектирования с помощью математического моделирования:

- анализируются и выбираются схемные решения ЖРД с целью оптимизации его энергетических характеристик и параметров узлов и агрегатов, в него входящих;
- рассчитываются основные статические и динамические характеристики регулирующих устройств двигателя, обеспечивающих требуемые диапазоны изменения параметров ЖРД в сочетании с устойчивостью системы регулирования;
- выбирается циклограмма срабатывания пуско-отсечных клапанов и регулирующих органов ЖРД, обеспечивающих его стабильный запуск и останов (циклограмма - это временная последовательность подачи команд на клапаны и регулирующие органы);
- определяются амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) двигателя по каналам внешних воздействий с целью исследования продольной устойчивости ракеты-носителя;
- исследуются вопросы внутривдвигательной устойчивости процессов;
- оценивается совместная работа двигателя с ракетными и стендовыми системами и исследуется ряд других вопросов.

На этапе экспериментальной отработки:

- уточняются требования к циклограмме работы двигателя;
- оптимизируются характеристики агрегатов и основные параметры двигателя;
- анализируются аварийные и аномальные ситуации.

На этапе серийного производства двигателей:

- оценивается влияние технологических отклонений, возникающих при изготовлении двигателя, на его эксплуатационные свойства и надежность;
- анализируются и моделируются нештатные ситуации;
- исследуются новые конструктивные решения, направленные на модернизацию двигателей и т.п.

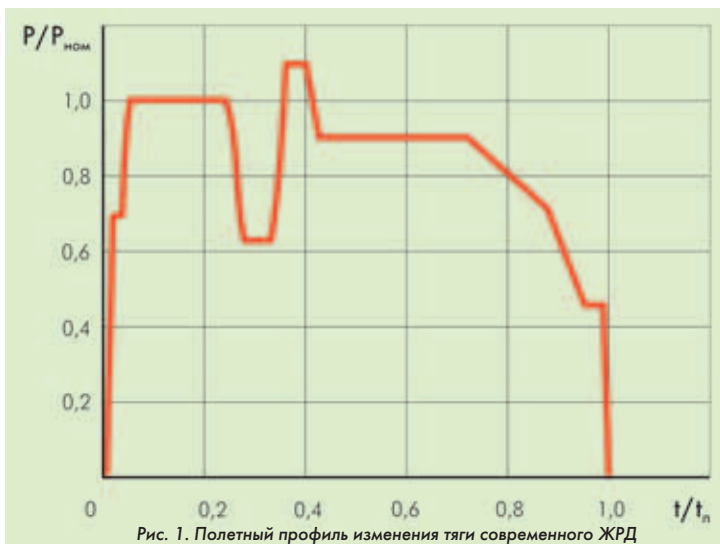


Рис. 1. Полетный профиль изменения тяги современного ЖРД

Почти пятидесятилетний опыт работы специалистов НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, накопленный в процессе создания нескольких десятков мощных ЖРД с разными схемами и на различных компонентах топлива, в сочетании с работами ведущих специалистов ИЦ им. М.В. Келдыша, ЦИАМ, ЦНИИМАШ, МВТУ и МАИ позволил отработать технологию построения полной нелинейной математической модели, описывающей рабочий процесс ЖРД на всех режимах работы.

Математическая модель представляет собой детерминированное описание нелинейными дифференциальными и алгебраическими уравнениями всех основных процессов, происходящих в узлах, агрегатах и двигателе в целом при его функционировании. При ее разработке используются представления о простейших гидродинамических элементах активного сопротивления, массы и емкости, отражающих одно определенное свойство моделируемой среды (инерционность, сжимаемость, вязкость) и описываемых уравнениями соответствующего фундаментального физического закона - сохранения количества движения, энергии и неразрывности течения.

В зависимости от полноты описания физических процессов и учета динамических явлений для одного и того же двигателя можно разработать множество математических моделей разной степени подробности и сложности, с различными пределами применимости модели по глубине изменения параметров, частотному диапазону и т.п. Математические модели полного цикла работы ЖРД обычно содержат 100...150 нелинейных дифференциальных



РД - 120

уравнений, в том числе и второго порядка, а также ~ 250... 300 алгебраических.

Математические модели принято разделять на статические, описывающие стационарные режимы работы ЖРД (когда движение жидкости и газа происходит с постоянными скоростями, вращение валов турбонасосного агрегата (ТНА) и бустерных насосных агрегатов (БНА) происходит с постоянными угловыми скоростями и т. п.), и динамические, описывающие нестационарные режимы, в которых все проявляющиеся скорости переменны. Только в динамике проявляются и влияют на протекание процессов инерция перемещаемых масс (жидкости в гидромагистралях, золотника регулятора расхода или редуктора, ротора ТНА и БНА в осевом направлении и т.п.) и вращающихся масс (ротора ТНА и БНА); тепловая инерция при передаче и распространении тепловых потоков; деформация стенок магистралей и элементов конструкций; сжимаемости жидкости и газа; изменение временных запаздываний при воспламенении и горении компонентов топлива и т. п.

Наибольшие трудности при разработке математических моделей встречаются при разработке моделей, описывающих запуск ЖРД. Это связано с тем, что данному режиму свойственен ряд специфических процессов. К ним относятся: процессы заполнения трубопроводов и смесительных головок газогенератора и камеры сгорания с одновременным истечением части компонента топлива из них; двухфазные течения; гидроудары в трубопроводах; кавитационные явления в насосах; частичный унос опережающего компонента топлива из газогенератора и, как следствие, увеличение влажности

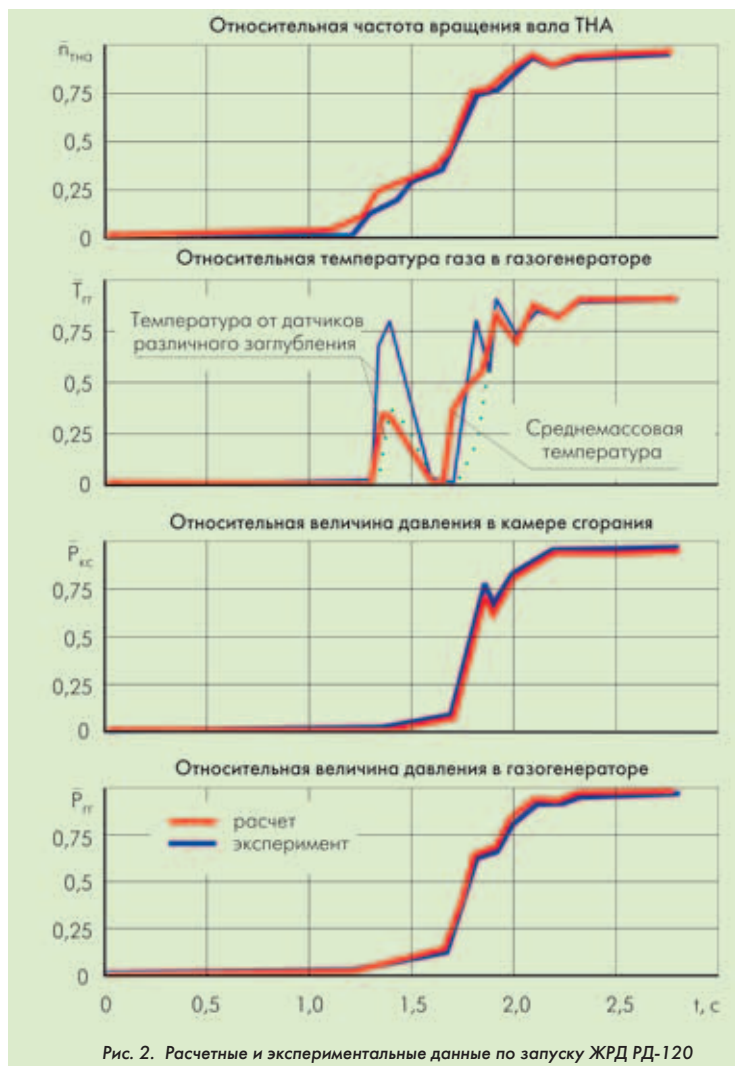


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные данные по запуску ЖРД РД-120

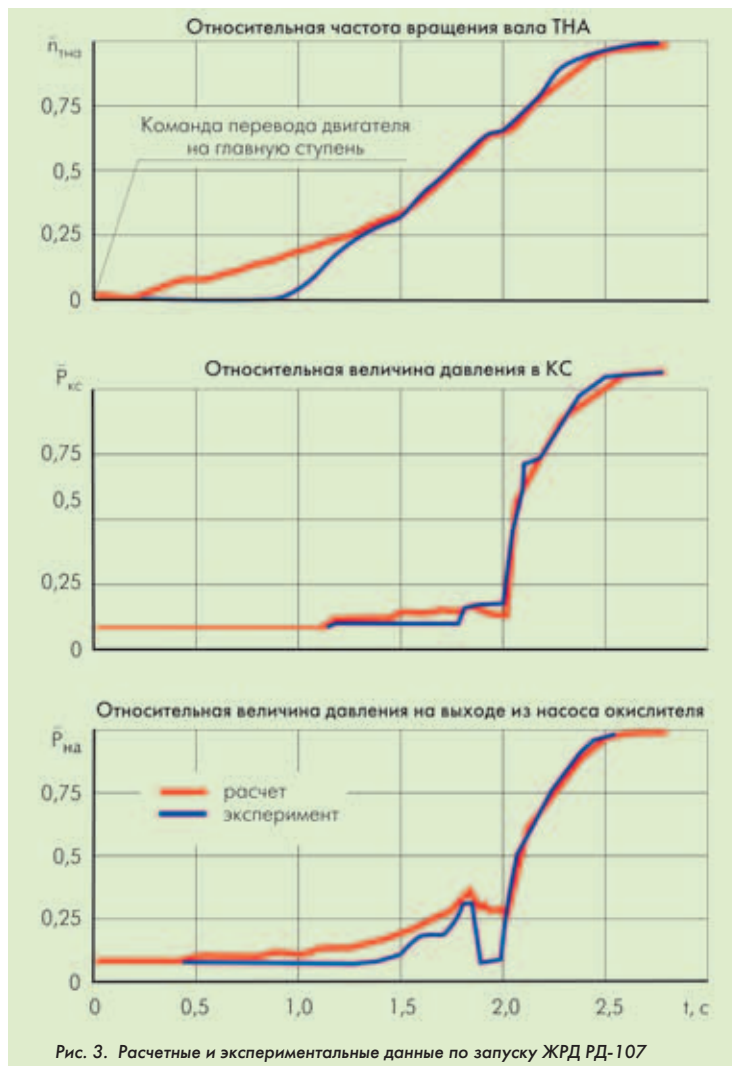


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные данные по запуску ЖРД РД-107

парагаза и снижение располагаемой мощности турбины; расщепление к.п.д.-характеристик насосов по частоте вращения; кинетика воспламенения и выгорания компонентов топлива и ряд других.

Определенные трудности возникают при решении больших систем нелинейных дифференциальных уравнений. Это связано с устойчивостью их численного решения из-за накопления ошибок аппроксимации и округления, а также из-за разномасштабности процессов, описываемых такими системами.

Накопленный НПО Энергомаш опыт позволил в настоящее время преодолеть многие из указанных трудностей. Для каждого вновь разрабатываемого ЖРД и для всех своих двигателей, находящихся в эксплуатации, НПО Энергомаш разработало современные математические модели полного цикла работы ЖРД. Так, на рис. 2 для сопоставления приведены результаты математического моделирования запуска двигателя РД-120, устанавливаемого на РН "Зенит", и результаты его огневых испытаний. Достаточно хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об адекватности математической модели реальным процессам, происходящим при запуске двигателя. С помощью математического моделирования специалисты НПО Энергомаш при экспериментальной отработке двигателя РД-120 обоснованно принимали решения, направленные на повышение его надежности.

На рис. 3 приведены данные сопоставления результатов математического моделирования процесса запуска двигателя РД-107 и его огневого испытания. Созданная пятнадцать лет назад математическая модель запуска двигателя РД-107, "возраст" которого более половины столетия, позволила глубже разобраться в процессах, происходящих в двигателе, и обосновать возможность перехода от пиротехнического к химическому зажиганию компонентов топлива в камере сгорания.

При создании двигателя РД-170, используемого на РН "Энергия" и РН "Зенит", а также двигателя РД-180 для РН "Атлас" широкое применение математического моделирования позволило НПО Энергомаш значительно сократить сроки и стоимость разработки.

В настоящее время НПО Энергомаш ведет отработку кислородно-керосинового ЖРД РД-191 для новой российской РН "Ангара". Двигатель, наряду со многими отработанными конструктивными решениями кислородно-керосиновых двигателей РД-120, РД-170 и РД-180, включает в себя ряд принципиально новых узлов и агрегатов, позволяющих значительно улучшить его энергомассовые характеристики.

Одним из новых решений является отказ от традиционной схемы управления агрегатами управления и регулирования (дроссе-

лем и регулятором расхода горючего), с помощью цифровых электро-пнеumo-гидроприводов и представляющих собой сложные, тяжелые, энергоемкие, высокомоментные, вибронеустойчивые агрегаты. Вместо них применены дроссель и регулятор расхода горючего, дроссельные части которых состоят из нескольких параллельных гидравлических блоков клапанов, а управление ими осуществляется электрогидравлическими клапанами золотникового типа. Путем изменения сочетания открытых и закрытых клапанов обеспечивается изменение площадей дроссельных частей регулятора расхода и дросселя и, соответственно, изменение расхода компонента топлива через регулятор и перепада давления на дросселе.

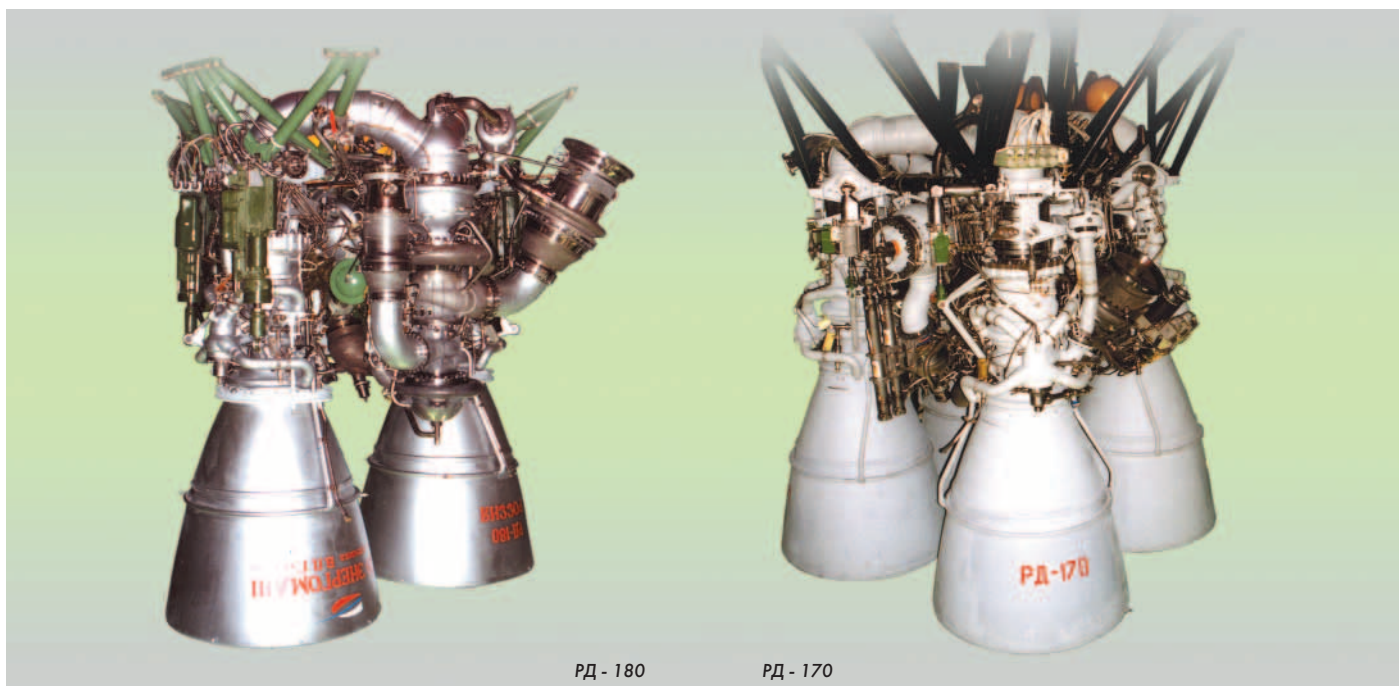
Для этого двигателя была разработана математическая модель полного цикла работы ЖРД, позволявшая выбрать циклограмму подачи команд на клапаны и регулирующие органы при запуске, начальные положения регулятора расхода и дросселя горючего перед запуском двигателя, скважности перенастройки и количество пропускаемых разрядов при перенастройке регулятора расхода и дросселя из начальных положений в положения, определяющие заданный режим работы двигателя по тяге и коэффициенту соотношения компонентов топлива и т.п. С учетом конкретных характеристик узлов и агрегатов первого экземпляра двигателя на основе результатов математического моделирования было выбрано определенное сочетание из 17 пусковых параметров, обеспечивших нормальный бесстартерный запуск двигателя РД-191.

Проведенная серия из четырех испытаний первого экземпляра двигателя РД-191 без съема с испытательного стенда показала, что выбранные пусковые параметры обеспечили нормальный, стабильный бесстартерный запуск при всех испытаниях.

Успешные испытания первого экземпляра двигателя РД-191 подтвердили важность математического моделирования, позволяющего существенно уменьшить риск возникновения аварийных ситуаций при отработке новых ЖРД.

Целенаправленную подготовку специалистов в области математического моделирования рабочего процесса ЖРД ведет Московский авиационный институт. Этому способствует вышедший недавно из печати учебник "Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей", написанный коллективом авторов из НПО Энергомаш и МАИ.

Сегодня, в условиях новых экономических отношений, широкое применение математического моделирования при разработке новых и эксплуатации ранее разработанных двигателей позволяет существенно уменьшить риск возникновения аварийных ситуаций и в значительной мере снизить уровень материальных затрат, а также сократить сроки разработки новой техники. **□**



РД - 180

РД - 170