



ОГНЕДЫШАЩИЙ «ИФРИТ»

Это имя пришло к нам из Корана. В одной из его Сур (27:39) рассказывается о страшном крылатом, извергающем огонь демоне, живущем под землей и обладающем как огромной разрушительной силой, так и незаурядной хитростью. Недаром Коран относит ифрита к числу «сильнейших из джинов». Однако и его, как любого джина, можно было заключить в лампу, чтобы потом использовать его мощь на благо человека. Но только сделать это способен был лишь самый великий волшебник.

В наши дни роль такого волшебника решились взять на себя ученые и инженеры российского НПО «Энергомаш» имени Валентина Глушко, приступившие несколько лет назад к созданию нового жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) детонационного типа и назвавшие свое детище «Ифрит».

Начиная разговор о детонационном ЖРД, нельзя не вспомнить известную истину: «новое — это хорошо забытое старое». Стоит вспомнить историю его предтечи — пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ПуВРД), принцип действия которого во многом схож с разрабатываемым детонационным ЖРД, поскольку работа того и другого двигателя носит импульсный характер.

Ошибочно полагать, что ПуВРД — детище немецких ракетостроителей середины XX в. На самом деле идею пульсирующего воздушно-реактивного двигателя рассматривали и даже независимо друг от друга запатентовали лет на 70 раньше немцев французский и русский инженеры Шарль де Луврье и Николай Телешов. Немецкие конструкторы, накануне Второй мировой войны активно занимавшиеся поиском новых

видов вооружения, не прошли мимо французско-русского изобретения, пока никем не реализованного. В Германии ПуВРД нашел применение в качестве двигателя крылатой ракеты (в терминологии тех лет — самолета-снаряда) Фау-1. Главный конструктор Фау-1 Роберт Люссер остановил свой выбор на ПуВРД не по причине его эффективности (в 30-е гг. прошлого века хорошо освоенные поршневые авиадвигатели имели тяговые характеристики ничуть не хуже), а, главным образом, из-за простоты конструкции и, как следствие, низкой трудоемкости изготовления и стоимости серийного производства нового двигателя. Кроме того, вследствие одноразового использования (в отличие от самолетных моторов) к ПуВРД не предъявлялись высокие требования по ресурсным характеристикам. Менее чем за год, с июня 1944-го по март 1945 г., промышленность Германии освоила серийное производство и выпустила более 10 тысяч двигателей для Фау-1.

ПуВРД работает в режиме пульсации, его тяга не нарастает непрерывно, как у прямоточных или самых распространенных в наше время турбореактивных двигателей, а складывается из серии импульсов, следующих друг за другом с частотой от 10 до 250 Гц. При этом чем выше развиваемая двигателем тяга, тем ниже частота пульсации.

Конструктивно ПуВРД достаточно прост: он представляет собой камеру сгорания с длинным цилиндрическим соплом, диаметр которого существенно меньше, чем у камеры сгорания. Воздух поступает в камеру сгорания из расположенного перед ней диффузора через автоматический клапан, работающий за

счет разницы давлений в камере и на выходе диффузора: когда давление в диффузоре выше, клапан открывается и пропускает воздух в камеру сгорания; при обратном соотношении давлений он закрывается. В передней части камеры сгорания размещены форсунки, через которые горючее впрыскивается в камеру под давлением наддува в топливном баке. Когда давление в камере после вспышки горючего превысит давление наддува, установленный в трубопроводе подачи горючего обратный клапан автоматически закрывается.

Поджигает горючее в камере установленная в ней свеча зажигания, выдающая в требуемый момент высокочастотную серию электрических разрядов. Через несколько секунд после того как смешавшееся с воздухом горючее воспламеняется, внутренняя поверхность камеры сгорания накаляется настолько, что далее для работы двигателя подача искры не требуется.

Принципиальным отличием ПуВРД от других видов воздушно-реактивных двигателей является наличие на его входе воздушного клапана, назначением которого является предотвращение обратного движения рабочего тела (продуктов сгорания топлива), что свело бы на нет реактивную тягу. В прямоточных и турбореактивных двигателях подобный клапан не требуется, т. к. давление воздуха на входе в камеру сгорания, создаваемое набегающим потоком (для прямоточных двигателей) либо компрессором, исключает обратное движение рабочего тела в тракте двигателя. В ПуВРД начальное сжатие воздуха слишком мало, а необходимое для создания реактивной тяги повышение давления в камере сгорания достигается только вследствие сжигания горючего в замкнутом пространстве, ограниченном стенками камеры, воздушным клапаном, а также инерцией газового столба в длинном сопле двигателя.

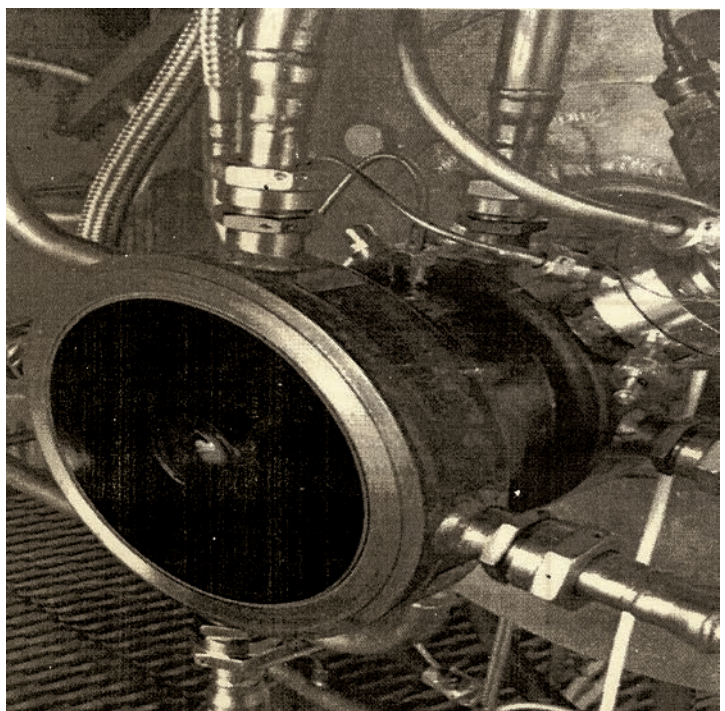
Поначалу полагали, что функционирование ПуВРД невозможно без движения аппарата, на котором он размещен, т. е. без встречного воздушного потока. Однако инженерам удалось создать конструкцию ПуВРД, способного довольно устойчиво работать, «стоя на месте», т. е. при отсутствии набегающего потока воздуха. Правда, развиваемая при этом тяга, как правило, недостаточна для старта летательного аппарата. Поэтому Фау-1 мог стартовать только с помощью паровой катапульты либо порохового ускорителя. В то же время ПуВРД имеет ограниченный диапазон скоростей полета, в котором обеспечивается его устойчивая и относительно продолжительная работа: 0,3–0,8 Маха (приблизительно 350–950 км/час).

Несмотря на многие отличия ПуВРД от других типов воздушно реактивных двигателей как в принципе действия, так и в конструкции, процесс горения топливной смеси в нем, как и в остальных двигателях, проходит в режиме дефлаграции. Другими словами, в нем имеет место процесс дозвукового горения, при котором образуется быстро перемещающийся фронт химических превращений. При этом передача энергии от зоны реакции вслед за перемещением фронта происходит преимущественно за счет конвективной теплопередачи. Подобный режим сгорания топлива принципиально отличается от детонационного режима, когда зона превращений распространяется со сверхзвуковой скоростью, а передача энергии происходит за счет

разогрева вследствие внутреннего трения в веществе при прохождении через него продольной ударной волны. И это, по мнению ракетостроителей, сулит большие как технические, так и экономические преимущества.

Использовать импульсный детонационный режим горения в ЖРД — идея, вообще говоря, не самая новая: еще в 1940 г. ее выдвинул будущий академик и трижды Герой соцтруда Яков Зельдович. В Журнале технической физики он поместил статью «Об энергетическом использовании детонационного сгорания». Позже идея получила развитие — ученые пришли к мысли, что наиболее рациональным и перспективным будет использование так называемой спиновой, т. е. вращающейся детонации, когда детонационная волна в камере сгорания ЖРД движется не в осевом направлении, а по кругу, сжимая и выжигая перед собой топливную смесь. При этом выбрасываемые из сопла продукты сгорания создают тягу. Таким образом, частоту пульсаций заменяет частота вращения детонационной волны, способная достигать десятков килогерц. При столь высокой частоте двигатель работает уже не в пульсирующем режиме, а практически как обычный ЖРД со стационарным горением. Но поскольку детонация топливной смеси при этом все же имеет место, получаемый эффект оказывается значительно выше.

Возможность и преимущества спиновой детонации теоретически были предсказаны также в СССР. В 1960 г. математическую модель этого процесса представил физик из Новосибирского академгородка Б. Войцеховский. Как нередко случается в науке, примерно год спустя такую же идею выдвинул американский ученый из Мичиганского университета Дж. Николлс. Работы по практической реализации детонационного горения развернулись по обе стороны Атлантического океана: в США, Германии, СССР. В этой бескомпромиссной гонке не раз менялись лидеры, но в наши дни ближе всех к финишу оказались российские ракетостроители из имеющего почти вековую историю НПО «Энергомаш» им. Вален-



«Ифрит» готов к огненным испытаниям

тина Глушко. ЖРД, разработанные этой фирмой, давно пользуются непрерываемым авторитетом у ракетостроителей во всем мире. Сегодня их используют все российские организации, причастные к созданию ракет-носителей, а также две американские ракетно-космические компании, в том числе и такая именитая, как Lockheed Martin. Но и сами ракетостроители США вложили немало сил и средств в разработку пульсирующих детонационных двигателей. Пока что их зримым достижением на этом поприще было создание действующей демонстрационной модели двигателя, поднявшегося в воздух 31 января 2008 г. на экспериментальном самолете. Хотя в этом полете двигатель проработал лишь 10 секунд, но и это посчитали достаточным для фиксации приоритета Соединенных Штатов в разработке принципиально новых ракетных двигателей. Сегодня совершивший этот суперкороткий полет самолет можно видеть в Национальном музее ВВС США.

Чтобы понять, каковы потенциальные возможности детонационных двигателей, надо сначала напомнить, в чем суть работы обычного ЖРД, который в примитивном изложении можно представить как некую огромную газовую горелку.

При сжигании топливной смеси в его камере сгорания образуется стационарный фронт пламени. Горение топливной пары (горючего с использованием собственного окислителя ракеты) происходит при неизменном давлении. Этот процесс и есть дефлаграция. В результате сгорания распыляемого из форсунок горючего температура газовой смеси в камере сгорания резко возрастает, и из сопла под огромным давлением вырывается огненный столб продуктов сгорания. При этом в полном соответствии с физическим законом сохранения импульса тела возникает реактивная тяга, обеспечивающая движение летательного аппарата. В реактивном двигателе остающегося в пределах земной атмосферы самолета проходят аналогичные процессы, с той лишь разницей, что вместо имеющегося на ракете бортового запаса окислителя самолетный двигатель использует в этом качестве кислород из окружающего его атмосферного воздуха.

Для увеличения тяги любого реактивного двигателя приходится поднимать давление в его камере сгорания. Естественно, растет и давление, под которым в камеру сгорания впрыскиваются горючее и окислитель. В противном случае их струи просто не смогут пробиться внутрь камеры. Так, у созданного для первой ступени советской сверхтяжелой ракеты-носителя «Энергия» самого на тот момент мощного в мире ЖРД типа РД-170, работающего на керосино-кислородной смеси, тяга составляет 680 тонн. При этом давление в камере сгорания достигает 250 кгс/см². В ходе последующих доработок и модернизаций этого двигателя его тяга возросла до 750 тонн, а давление в камере сгорания до 280 кгс/см². Чтобы при таком давлении в камере закачивать в нее через форсунки компоненты топлива, необходимо обеспечить на выходе насосов горючего и окислителя гораздо большее давление. Так, в РД-170 давление на выходе насоса окислителя достигает 600 кгс/см². Для привода такого насоса используется турбина мощностью около 190 Мегаватт. При диаметре ротора всего лишь 40 мм турбина работает при скорости порядка



Пульсирующий реактивный двигатель (ПуРД) на крылатой ракете Фау-1

15 000 оборотов в минуту. Поэтому самым сложным и дорогостоящим узлом ЖРД является турбонасосный агрегат (ТНА), обеспечивающий подачу в камеру сгорания обоих компонентов ракетного топлива. Надо сказать, ЖРД за последние десятилетия были доведены до высокой степени совершенства и, вероятно, вплотную приблизились к пределу своих возможностей. Аналогичная ситуация сложилась с поршневыми авиационными двигателями в середине XX в., когда дальнейшее повышение их мощности не давало желаемого эффекта из-за одновременного роста веса.

Повысить удельные характеристики ЖРД в будущем, если и возможно, то лишь в очень незначительных пределах — буквально на считанные проценты. Потому-то мировая космонавтика до сих пор движется по экстенсивному пути развития: для дальних пилотируемых полетов строятся исполинские чрезвычайно сложные и фантастически дорогие ракеты-носители. Создание и внедрение детонационных ЖРД вполне можно поставить в один ряд с революционным переходом авиации на реактивную тягу. Новые двигатели способны ускорить процесс освоения космоса.

Переход на ЖРД дотационного типа решит одну из главных проблем — позволит отказаться от сверхмощных ТНА, благодаря тому, что необходимое для полного и высокоэффективного сгорания топлива здесь обеспечивает сама детонация, которая и представляет собой бегущую в топливной смеси волну сжатия. При детонации давление увеличивается в 18-20 раз без всякого ТНА. Подсчитано: для обеспечения в камере сгорания детонационного двигателя условий, аналогичных имеющим место в камере сгорания ЖРД американского «Шаттла» (где давление составляет 200 кгс/см²), достаточно закачивать компоненты топлива под давлением всего 10 кгс/см². Необходимый для этого агрегат похож на используемый в классическом ЖРД не более, чем автомобильная помпа на турбину мощной ГРЭС. Таким образом, детонационный двигатель обещает стать не только мощнее и экономичнее обычного ЖРД, но и существенно проще, а стало быть, и дешевле.

Конечно, возникает вопрос, почему, если все так прекрасно, инженеры сразу не пошли по этому пути? Что им мешало сделать это давным-давно?

Главная проблема, вставшая на пути создания детонационных двигателей, — это как совладать с детонационной волной. Дело ведь не только в том, что двигатель должен быть прочнее, чтобы выдерживать повышенные нагрузки. Детонация — это не простая взрывная волна, которая распространяется со скоростью звука. Детонационная волна продвигается со сверхзвуковой скоростью (до 3 000 м/сек), т. е. на порядок быстрее звука. К тому же она не образует стабильного фронта пламени, поэтому работа такого двигателя носит пульсирующий характер. После каждой детонации необходимо обновить топливную смесь, после чего запустить в ней новую волну, причем, чтобы сгладить пульсацию, циклы такого обновления должны проходить с огромной частотой — в десятки килогерц.

По сути своей, детонация — то же самое горение, но происходящее в сотни раз быстрее, чем при обычном сжигании топлива. Поэтому детонацию часто ошибочно принимают за взрыв. Детонационное горение — процесс столь скоротечный, что при нем продукты реакции даже не успевают расширяться. В результате детонация (в отличие от дефлаграции) проходит при постоянном объеме и резко возрастающем давлении. Если при обычном сжигании топлива в камере сгорания двигателя формируется стационарный фронт пламени, то при детонационном горении вместо этого образуется детонационная волна. В этом мчащемся со сверхзвуковой скоростью ударном фронте и происходит детонация топливной смеси. Конструктивно спиновый, детонационный двигатель представляет собой кольцевую камеру сгорания. Форсунки для вдувания в нее горючего и окислителя размещаются по периметру камеры радиально. Как уже упоминалось выше, зарождающаяся в камере сгорания детонационная волна движется по кругу, сжимая перед собой и выжигая топливную смесь, а продукты сгорания выбрасывая из сопла.

С точки зрения термодинамики такой процесс куда более эффективен, чем обычное сжигание топлива. КПД при детонационном сгорании оказывается на 25–30 % выше. Иными словами, при сжигании одинакового количества топлива детонационный двигатель развивает больше тяги, а если еще учесть компактность зоны горения, то по удельной мощности (на единицу объема) спи-

новый детонационный двигатель теоретически может превосходить обычные ЖРД на порядок. Сегодня проблемами детонационных двигателей активно занимаются в США, России и Китае. Но последнему, лишь относительно недавно вышедшему на достаточно высокий уровень технологий, до практических результатов еще далеко. Специалисты полагают, что их можно ожидать не ранее, чем лет через 10–12. Впрочем, Китай уже не раз удивлял мир своими стремительными рывками. Другие страны пока не могут стать реальными участниками этой гонки — в лучшем случае они в состоянии произвести лишь обычные ЖРД.

В США исследования при участии NASA ведутся в General Electric. Здесь сделали ставку прежде всего на разработку спиновых детонационных газотурбинных двигателей для нужд флота. Это сулит прямой и близкий экономический эффект: сегодня на 129 кораблях ВМФ США используется 430 газотурбинных установок, съедающих ежегодно топлива на три миллиарда долларов. Естественно, в случае успеха разработки внедрение более экономных детонационных газотурбинных двигателей (ГТД) позволит сберечь гигантские средства.

Кстати, американцы в своем детонационном двигателе предполагают в качестве топлива использовать так называемую стехиометрическую смесь водорода и воздуха. Стехиометрической считается такая смесь, в которой окислителя содержится ровно столько, сколько необходимо для полного сгорания горючего. Вообще смесь водорода и кислорода считается наиболее удобной для изучения спиновой незатухающей детонации.

В России над детонационными двигателями работают и продолжают работать десятки НИИ и КБ, лидером среди которых остается НПО «Энергомаш».

Хотя разработки проводятся уже немало лет для российского Министерства обороны, они все еще представляются как «слишком перспективные», чтобы выделять на них средства. Военным, как всегда, хотелось бы иметь скорый и гарантированный практический результат, а до него еще очень далеко. Первый двигатель, вероятно, можно ждать минимум к 2020 г., после чего еще предстоит длительные тестовые испытания прототипов на надежность, проведение опытно-конструкторских работ и организация производства, а также разработка носителя под новый двигатель либо доработка под него существующих носителей.

К середине 2016 г. многолетние теоретические исследования и эксперименты, проводимые в «Энергомаш» специализированной лабораторией «Детонационные ЖРД», ознаменовались ощутимым успехом. В июле этого года со стенда НПО, расположенного в подмосковных Химках, разнесся мощный рокот. Это впервые заговорил в полный голос прирученный человеком «Ифрит». Так начались огневые испытания одного из двух первых в мире полноразмерных демонстрационных образцов детонационного жидкостного ракетного двигателя, работающего на топливной паре «керосин — кислород». Событие стало действительно большой победой ученых и инженеров отрасли, которую не оставили без внимания информационные агентства всего мира.



Стенды «Энергомаша», где ракетные двигатели впервые выдают поток огня