

С первых лет своей научно-технической деятельности В.П. Глушко уделял большое внимание поиску химических источников энергии, обеспечивающих максимальную эффективность создаваемым ЖРД. С этой целью он исследовал различные сочетания компонентов ракетного топлива. Так, в 1930-1933 гг., работая в газодинамической лаборатории, он на простейших камерах проводил опыты по исследованию горения и энергетической эффективности топлив. В качестве окислителя использовались жидкий кислород, азотная кислота и ее растворы с азотным тетроксидом, перекись водорода, хлорная кислота, тетранитрометан, в качестве горючего - бензин, смеси бензина с бензолом, толуол, керосин, диспергированные в жидком горючем бериллий, алюминий, литий, бор.

Исследования, связанные с использованием в ЖРД новых высокоэффективных ракетных топлив, были продолжены в послевоенный период, когда ракетная техника превратилась в одну из важнейших научно-технических отраслей народного хозяйства СССР. На смену лабораторным поискам талантливых одиночек пришла организация научно-исследовательских работ на государственном уровне. И в сфере этих работ идеи Глушко нашли свое воплощение. В результате его целенаправленной деятельности в 60-х годах были внедрены ставшие наиболее широко используемыми в отечественной ракетной технике "штатные компоненты" - несимметричный диметилгидразин и азотный тетроксид. В 60-70 гг. были проведены фундаментальные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию в качестве окислителей высококонцентрированной перекиси водорода и жидкого фтора.

Работы по фторной тематике в ОКБ-456, возглавляемом В.П. Глушко, были начаты в 1954 г. после выхода в декабре 1953 г. постановления Совета Министров СССР, регламентирующего развертывание широкомасштабных работ по исследованию новых ракетных топлив, в том числе и по фтору и его соединениям в качестве окислителя. Работы проводились на территории экспериментальной площадки Государственного института прикладной химии (ГИПХ) под Ленинградом силами лаборатории № 62, укомплектованной специалистами одного из научно-испытательных отделов ОКБ-456.

Начался этап ознакомления с особенностями свойств монооксида фтора. Первоначально внимание было сосредоточено именно на этом фторном соединении, новом для ракетной техники химическом веществе. Изучалось ее воздействие на конструкционные материалы при различных температурах и давлениях, накапливался опыт длительного хранения монооксида фтора. Спустя некоторое время аналогичные работы стали проводиться с газообразным, а затем и с жидким фтором, также обладающим букетом "отрицательных черт характера".

Из общего курса химии известно, что фтор - низкокипящая ($t_{\text{кип}} = -188^\circ\text{C}$), чрезвычайно химически агрессивная и токсичная жидкость. Чем же вызван интерес к столь неудобному в эксплуатации веществу? А все дело в том, что фтор в ряду химических веществ, являющихся окислителями, занимает первое место по энергетической эффективности взаимодействия его с другими химическими веществами, пригодными в качестве горючего. Таким образом, уже в самом начале индустриального этапа развития отечественной ракетной техники была поставлена задача получения максимальной эффективности от используемого топлива.

Накопленный опыт обращения с жидким фтором и его соединениями позволил ОКБ-456 с марта 1956 г., после выхода соответствующего распоряжения правительства СССР, перейти к исследованию процессов горения в модельных камерах и газогенераторах. Для этой цели использовалась разработанная в 1948 г. первая в СССР паяная камера КС-50. Однако для продолжения работ по созданию фторного ЖРД масштабы лаборатории № 62, расположенной на арендуемой у ГИПХ территории, стали недостаточными, требовались организационные изменения.

По инициативе Глушко в марте 1958 г. Совет Министров СССР издал постановление, в соответствии с которым близости от города Приморска (Выборгский район Ленинградской области) был организован филиал № 1 ОКБ-456. В этом филиале впоследствии и сосредоточились все экспериментальные работы по созданию ЖРД на фторном топливе. По результатам расчетно-теоретического анализа и сравнительных испытаний была выбрана основная пара компонентов топлива — фтор и аммиак.

В качестве горючего первоначально рассматривались гидразин, аммиак и водород. Несмотря на то, что аммиак из указанной

троицы обладает наименьшей энергетической эффективностью, остановились именно на нем, поскольку по физико-техническим характеристикам (температура плавления, сохранение стабильности, отсутствие склонности к термическому разложению и т.п.) он заметно превосходит гидразин. А водород было решено использовать при разработке последующих вариантов двигателей, когда будут решены специфические "фторные" конструкторские и эксплуатационные проблемы.

Программа работ по созданию фторного ЖРД предусматривала поэтапное изучение особенностей организации смесеобразования и устойчивости горения в камере и газогенераторе, эффективности охлаждения камеры аммиаком, выбор материалов деталей, контактирующих с жидким фтором и продуктами его сгорания. Работы проводились в течение второй половины 1958 г. и всего 1959 г. на модельных камерах ЭК-500 тягой в 500 кгс, а затем — на камере ЭК-1500 тягой в 1,5 тс.

В конце 1959 г. Глушко провел расширенное научно-техническое совещание с участием научных сотрудников отраслевого НИИ-1 и ГИПХ, в ходе которого было установлено, что исследовательских материалов накоплено достаточно, продолжение НИР для ОКБ-456 становится малоэффективным, пора переходить к конкретной разработке двигателя.

В результате принятого решения в начале 1960 г. был заложен проект двигателя тягой 10 тс на топливе фтор + аммиак с давлением в камере сгорания 120 атм и дожиганием восстановительного генераторного газа. Определенный термодинамическим расчетом удельный импульс тяги составлял 405 с. Разрабатываемый двигатель, получивший индекс 8Д21, создавался без технического задания от головного разработчика, не были определены ни ракета-носитель, ни космическая операция, для которых он предназначался. По сути, этот вариант двигателя являлся опытным, стендовым, но мог стать основой для последующей разработки летного образца. Создание предварительного варианта фторного ЖРД предусматривало разработку конструкторской основы будущего штатного двигателя, освоение технологии изготовления, получение практических навыков проведения огневых испытаний и накопления опыта эксплуатации стендового оборудования, работающего в среде жидкого фтора.

Отсутствию технического задания от ракетного ОКБ В.П. Глушко не придавал большого значения. Как только двигатель с удельным импульсом тяги, превышающим как минимум на 50 с соответствующий показатель у лучшего из существовавших в то время ЖРД, будет надежно работать на стенде, такому двигателю обязательно найдется применение для решения космической задачи, считал он. Что же касается привязки к ракете, то необходимые изменения могли быть быстро внесены в конструкцию уже разработанного двигателя. Главное — создать стабильно работающий ЖРД с удельным импульсом тяги не менее 400 с.

ФТОРНЫЙ

ЖРД: СООТНОШЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ



Вячеслав Рахманин, ведущий специалист НПО Энергомаш

Предложенная в 1960 г. конструкция двигателя прошла через все последующие годы его доводки без существенных изменений. Надо сказать, что фторный двигатель имел конструктивные особенности, отличавшие его от разработанных в ОКБ-456 двигателей до и после него, к основным из которых следует отнести:

- применение схемы с дожиганием восстановительного генераторного газа;
- охлаждение полным расходом горючего последовательно сопла, корпуса камеры и внутреннего днища смесительной головки, после чего горючее подавалось в газогенератор;
- использование гофрированной проставки в сверхзвуковой части сопла камеры вместо традиционной силовой "рубашки";
- применение в конструкции специально разработанных уплотнений в ТНА и агрегатах автоматики вследствие использования агрессивного компонента топлива.

Здесь следует отметить некоторую особенность в разработке фторного двигателя. Он представлял собой одновременно и "любимого дитя" В.П. Глушко, и "незаконнорожденного ребенка", ведь его параметры и характеристики были выбраны на инициативной основе. Хотя в 1960 г. вышло постановление правительства, поручавшее ОКБ-456 вместе с НИИ-1 и ГИПХ проведение работ по созданию ЖРД с использованием фтора в качестве окислителя, но на разработку такого двигателя не было ни ТЗ, ни директивных правительственных сроков готовности. Параллельно с ним в ОКБ-456 велась разработка двигателей 8Д716 для ракеты Р-9, 8Д514 для Р-14, 8Д712 и 8Д713 для Р-16, поэтому внимание руководства КБ и завода было сосредоточено на этих двигателях. Конечно, на предприятии авторитет Глушко был непререкаем, и, зная его отношение к фторному ЖРД, никто не позволял себе выражать сомнения в целесообразности этой разработки. Однако наиболее опытные конструкторы были заняты разработкой и доводкой указанных выше двигателей для боевых ракет. В результате разработкой двигателя 8Д21 занялись, в основном, молодые инженеры, выпускники МАИ и МВТУ 1958-62 гг. Не обремененные излишней опекой старшего поколения и окрыленные возможностью разработки собственного варианта нового двигателя, начинающие конструкторы смело отходили от привычных и проверенных на практике конструкций агрегатов ЖРД. Конечно, полной бесконтрольности не было. Руководители конструкторских бригад своевременно поправляли "бьющую через край" фантазию молодых разработчиков.

Так, в сочетании новых конструкторских идей и опыта создания надежной конструкции родился двигатель, фрагменты конструкции которого нашли свое продолжение в последующих разработках ОКБ-456. Оригинальность конструкции ряда агрегатов фторного ЖРД потребовала применения новых технологий. В помощь специалистам ОКБ № 456 были привлечены научные сотрудники отраслевого НИИ технологии машиностроения, кото-

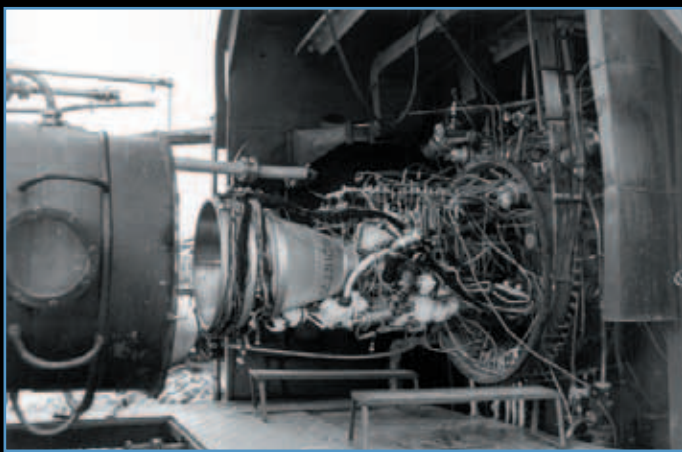
рые несколько месяцев работали в отделе главного технолога и цеховых техбюро завода. Совместная деятельность работников завода и НИИ привела к успеху - технологии были разработаны в достаточно короткий срок.

Параллельно велась подготовка испытательной базы. В Приморском филиале были построены стенды для испытаний полно-размерной камеры и газогенератора с вытеснительной системой подачи компонентов топлива. Проекты стендов предусматривали их последующую реконструкцию для испытаний двигателя и автономных испытаний ТНА. Агрегаты автоматики проходили испытания на стендах лаборатории № 2 с применением натуральных компонентов топлива. Коллектив инженеров-экспериментаторов Приморского филиала состоял преимущественно из молодых выпускников Ленинградского военно-механического института. Возглавлял филиал в эти решающие для становления испытательной базы годы Е.Н. Кузьмин, начавший свою трудовую биографию еще в начале 30-х годов под руководством В.П. Глушко в ГДЛ.

Первое огневое испытание двигателя 8Д21 состоялось в августе 1963 г. До конца 1965 г. было проведено еще 97 испытаний суммарной продолжительностью более 1200 с, при этом продолжительность непрерывной работы ЖРД составляла от 1,8 до 40 с. При испытаниях были опробованы различные варианты агрегатов и выбраны материалы деталей двигателя, подтверждена возможность получения заложенных при проектировании основных параметров, в том числе удельного импульса тяги (не менее 400 с), получен поистине неоценимый опыт работы с жидким фтором.

Одной из главных технических сложностей использования фтора является его исключительно высокая химическая агрессивность, приводящая к возгоранию большинства веществ. А если есть источник возгорания, то в среде фтора процесс горения интенсивно развивается, гореть начинают даже металлы, обычно с фтором не взаимодействующие. Причиной возгорания могло быть любое загрязнение полостей двигателя в процессе его изготовления. Именно из-за этого происходили аварии на первых секундах испытаний в начальный период отработки двигателя 8Д21. Эту неприятную сторону работы с фтором удалось преодолеть путем обработки внутренних полостей двигателя и стеновых магистралей по специальной технологии, разработанной испытателями филиала совместно с научными сотрудниками ГИПХа.

Результаты разработки фторного двигателя вскоре заинтересовали создателей ракет. В ОКБ-1 С.П. Королева рассматривались варианты использования нового ЖРД в "лунной" ракете-носителе Н1. Реагировало на работы по фторной тематике и руководство отрасли. В ноябре 1962 г. Госкомитет по оборонной технике выпустил приказ, который, наряду с требованиями форсировать работы по созданию двигателя, обязывал ОКБ "Южное" выдать в 1963 г. в ОКБ-456 техническое задание и приступить к разработке эскизного проекта верхней ступени тяжелого носителя с



использованием фторного двигателя. Однако высокая токсичность и химическая агрессивность фтора отпугивали даже такого смелого новатора ракетной техники, каким был главный конструктор ОКБ "Южное" М.К. Янгель. Выпуск ТЗ затянулся, оно поступило в ОКБ-456 только в 1965 г.

По предложению Глушко двигатель 11Д13 для ОКБ "Южное" создавался на основе задела, полученного при разработке 8Д21. Внесенные ракетчиками некоторые новые требования были оперативно отражены в конструкции агрегатов. В ходе 308-ми огневых стендовых испытаний с суммарной продолжительностью более 40 000 с двигатель 11Д13 был полностью отработан на соответствие ТЗ, однако до установки его в ракету дело не дошло, поскольку проект тяжелого носителя ОКБ "Южное" не получил дальнейшего развития.

И все же фторный двигатель с его выдающимися характеристиками не мог остаться невостребованным. Его время пришло во второй половине 60-х, когда появился проект вывода на геоцентрическую орбиту тяжелой телекоммуникационной станции. Расчеты потребной энергии ракеты-носителя подтвердили целесообразность использования фторного ЖРД для разгонного блока на верхней ступени РН "Протон". Практически только уникальное сочетание удельного импульса тяги и весовых характеристик фторно-аммиачного топлива позволяло вывести на стационарную орбиту телекоммуникационную станцию прямого приема сигнала на бытовые приборы.

В июне 1969 г. вышло постановление правительства о разработке фторно-аммиачного двигателя тягой 10 тс с многократным включением (не менее трех раз) и суммарной продолжительностью работы не менее 420 с. Техническое задание на разработку двигателя, получившего обозначение 11Д14 (по классификации КБ Энергомаш - РД-301), выдало КБ прикладной механики (главный конструктор М.Ф. Решетнев). Основу конструкции двигателя 11Д14 составили узлы и агрегаты, отработанные в составе двигателей 8Д21 и 11Д13. Изменения коснулись главным образом агрегатов автоматики и были связаны с требованием многократного запуска в условиях невесомости и глубокого вакуума. Проблемной являлась также отработка промежуточных отключений восстановительного газогенератора, так как у одноразовых двигателей 8Д21 и 11Д13 в газогенераторном тракте турбины и смесительной головке камеры при отключении образовывались отложения твердых фтористых солей, исключавшие возможность повторного запуска.

В 1969-72 гг. в КБ Энергомаш велась отработка двигателя на соответствие новым требованиям, а в январе 1973 г. были начаты зачетные испытания, положительные результаты которых позволили окончательно утвердить выбранную конструкцию двигателя и перейти к завершающим доводочным испытаниям, проводимым Межведомственной комиссией в три этапа. На последнем, третьем этапе предполагались испытания двигателя в составе разгонного блока ракеты на специально оборудованном стенде.

Однако в 1977 г. произошли события, роковым образом повлиявшие на дальнейшее использование фторного двигателя. Со-

ветский Союз присоединился к международному соглашению, в соответствии с которым решением Всемирной административной комиссии по радиовещанию был ограничен диапазон частот и мощностей на спутниках непрерывного телевидения (СНТВ). Это ограничение сделало нецелесообразным создание тяжелой телекоммуникационной станции, и необходимость в разработке разгонного блока с двигателем 11Д14 отпала. Отказ от создания блока был зафиксирован в постановлении правительства, датированном февралем 1977 г., хотя еще до его выхода работы по 11Д14 были успешно завершены. Двигатель был полностью отработан на соответствие требованиям ТЗ, его суммарная наработка составила более 200 000 с. Увы, победа осталась невостребованной. Впоследствии фторным ЖРД ни в КБ Энергомаш, ни в отечественной ракетной отрасли никто не занимался.

А был ли он нужен объективно? Большинство специалистов-ракетчиков на этот вопрос отвечают однозначно и категорически - нет! Но, как показывает история человечества, мнение большинства еще не является безоговорочной истиной. Нужны доводы, аргументы, доказательства. Не претендуя на всесторонний охват, попробуем привести их хотя бы частично.

Как уже указывалось, в ряду химических веществ, пригодных для использования в ЖРД, фтор в качестве окислителя занимает первое место по энергетическим характеристикам. Именно эта объективная истина заставила Глушко попытаться использовать фтор в качестве компонента ракетного топлива. В период начала разработки ЖРД 8Д21 применение пары фтор + аммиак давало прирост удельного импульса тяги на 50...85 с по сравнению с кислородными ЖРД, имевшимися или разрабатывавшимися в тот период. Если бы Глушко намеревался ограничиться применением фтора только в паре с аммиаком, т.е. получить удельный импульс на уровне 400 с, то, безусловно, все затраты на внедрение в ракетную отрасль такого токсичного и химически агрессивного вещества не окупались бы.

Но Глушко мыслил перспективно. После освоения фтора с аммиаком планировалась разработка двигателя на топливе фтор + водород. Проект такого двигателя 11Д16 разрабатывался в 1963-65 гг. Пара фтор + водород позволяла довести удельный импульс до 470...475 с, что близко к максимально возможному значению этого показателя для химических источников энергии в ракетных двигателях. Следующий, качественно более высокий уровень удельного импульса тяги может быть получен только при использовании ядерного ракетного двигателя.

Существует ли альтернатива фторно-водородному топливу применительно к ЖРД? Безусловно, да. Это топливо, предложенное еще К.Э. Циолковским в опубликованном им в 1903 г. научном труде "Исследование мировых пространств реактивными приборами", — кислород + водород. Вообще, водород в качестве горючего в ракетной технике целесообразно использовать в двигателях второй и последующих ступеней мощных космических ракет-носителей. В то же время известно, что на первом этапе раз-



Слева направо:

Двигатель 8Д21 на испытательном стенде

Общий вид стенда

В.П. Глушко (справа) вручает Е.Н. Кузьмину памятную медаль



вития отечественной космической техники космические системы создавались на основе ракет боевых комплексов: на базе межконтинентальной ракеты Р-7 была создана РН "Спутник", на базе Р-12 и Р-14 — "Космос" и "Интеркосмос", на базе УР-500 и Р-36 — "Протон" и "Циклон". Естественно, что ни о каких водородных двигателях на этих ракетах не могло быть и речи. Кроме того, к жидкому водороду, как к компоненту ракетного топлива, в связи с его крайне низкими удельным весом и температурой кипения длительное время отношение было довольно скептическим.

Только в проекте первой отечественной "чисто космической ракеты" Н1, предназначенной для экспедиции на Луну, предусматривалось использование на верхних ступенях кислородно-водородных двигателей разработки КБХМ А.М. Исаева и ОКБ А.М. Люлька. Печальная судьба Н1 известна. Практическое применение кислородно-водородный двигатель РД-0120 разработки КБХА под руководством А.Д. Конопатова получил на второй ступени РН "Энергия". Печальная судьба "Энергии" также известна. Однако, несмотря на эти негативные результаты, появление кислородно-водородных двигателей составило конкуренцию фторным ЖРД. Сравнение характеристик реально существовавших конструкций показывает, что фторно-аммиачный двигатель 11Д14 по удельному импульсу тяги существенно уступил кислородно-водородному РД-0120 - соответственно 400 и 455 с.

Остается сравнить показатели экономичности двигателей, работающих на топливах фтор + водород и кислород + водород. Хотя "в металле" двигатель на фторно-водородном топливе не был разработан, но с большой степенью уверенности можно утверждать, что на базе имеющихся проработок такого двигателя в ОКБ-456, а также с использованием апробированных технических решений двигателей 11Д14 и РД-0120 успешная разработка фторно-водородного двигателя вполне реальна, при этом можно получить параметры и характеристики, близкие к расчетным. Проведенное сравнение удельных импульсов тяги двигателей, работающих на топливах фтор + водород и кислород + водород показало, что фторный двигатель обладает на 20 с большим удельным импульсом тяги.

Но окупит ли это приращение те затраты по организации транспортировки, хранения, разработки специальной наземной

инфраструктуры для работы с чрезвычайно токсичным и химически активным фтором? На этот вопрос объективный ответ можно дать только по итогам решения конкретной задачи.

Таким образом, учитывая всю сложность эксплуатации фторного ЖРД, его использование в ракетной технике можно считать оправданным лишь в том случае, если поставленную космическую задачу не удастся решить другими средствами. Так было при подготовке вывода на геостационарную орбиту крупной телекоммуникационной станции. Так же решался вопрос и о применении водорода в двигателях второй ступени РН "Энергия", когда вывести на требуемую орбиту необходимую нагрузку с использованием другого топлива не представлялось возможным.

Подводя итоги рассказу об истории разработки фторных двигателей и анализу их места среди современных ЖРД, выскажу собственное мнение о перспективах их применения. Оно не обязательно совпадает с мнением других работников НПО Энергомаш. Можно себе представить некую гипотетическую космическую задачу, для решения которой удельной энергетики кислородно-водородного топлива окажется недостаточно. В этом случае предстоит сделать выбор из трех наиболее реальных вариантов:

- ЖРД на фторно-водородном топливе,
- ЖРД на трехкомпонентном топливе: фтор + водород + литий;
- ЯРД с водородом в качестве рабочего тела.

Учитывая весь комплекс технических вопросов, подлежащих решению в процессе разработки и эксплуатации указанных двигателей, и уровень получаемых при их работе параметров, автор склонен считать целесообразной концентрацию усилий на разработке ЯРД, который способен обеспечить получение существенно более высокого удельного импульса тяги, чем ЖРД.

В заключение отметим, что опыт работы с фтором в НПО Энергомаш не остался не востребуемым. Он был успешно использован при создании химического лазера с непрерывным излучением, у которого одним из компонентов рабочего тела является жидкий фтор. Достигнутые результаты докладывались на международных конференциях, сопоставлялись с результатами подобных работ в США. По общему признанию, наши разработки обладают определенными преимуществами по сравнению с зарубежными аналогами.

DIGEST

In response to a resolution passed in December 1953 by Council of Ministers of the USSR and aimed at expanding research works on new rocket fuels, ОКБ-456 experimental design bureau headed by V.P. Glushko launched research works related to fluorine fuels. Hydrazine, ammonia and hydrogen were tested as fuels. Initially, a preference was given for ammonia; it was concluded that hydrogen should be used in future engine projects. In early 60s the project of 10,000-kgf thrust 8D21 engine with 120 ATM in the combustion chamber and 405-s specific thrust pulse was launched. The design concept of this engine passed through a many-year development without considerable changes. The first firing test of 8D21 engine was in August 1963. 97 tests with 1200-s accumulated operating time were completed by the end of 1965. In late 60s a new project appeared which was related to injection of a heavy-weight telecommunication station to a geocentric orbit. Calculations of required power of the rocket booster capabilities of a fluorine liquid-propellant engine. In 1969-1972, "Energomash" Design Bureau optimized the engine to meet new requirements and in January 1973 started evaluation tests. However, the fluorine engine was not tested on a full-scale rocket because the project of this station development was shelved.

FLUORINE LIQUID-PROPELLANT ENGINE: CAPABILITIES AND DEMANDS