



Спросите специалиста: каков самый важный узел жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)? Он же самый сложный, наукоёмкий, дорогой и ответственный? Ответ однозначен — это турбонасосный агрегат, который подаёт топливо в камеру сгорания (ТНА).

ТНА работают на пределе своих возможностей и имеют весьма ограниченный ресурс. Известна обратно пропорциональная зависимость эффективности ракетного двигателя и его надёжности. По этой причине, высокоэффективный и дорогой в изготовлении двигатель зачастую оказывается одноразовым. Многоразовость, ставшая магистральным трендом развития современного ракетостроения, требует радикального снижения напряжённости работы ТНА. Как следствие, для повышения надёжности, все современные ракетостроители жертвуют либо удельным импульсом, либо идут на повышение общей массы аппарата.

25 мая 2017 г. взлетела ракета Electron новозеландской компании Rocket Lab. Главным новшеством можно считать применение электропривода, работающего на литий-полимерных батареях для насоса.

Подсчеты подсказывают, что, несмотря на заявленную в 95% КПД электромоторов, энергоёмкость самых современных литий-полимерных батарей более чем втрое меньше энергоёмкости пероксида водорода, применявшегося ещё на заре космонавтики. Никакая эф-

фективность электромоторов такую разницу в массах источников энергии не вытянет.

Кажется нелогичным, почему Rocket Lab решила пойти инновационными тропами. Создать турбонасос на пероксиде водорода конечно сложнее чем «воткнуть» готовый электромотор с готовой батареей, но все же значительно проще разработки ТНА замкнутого цикла. Видимо Rocket Lab, как коммерческая организация, учла все нюансы и, несмотря на энергоёмкие издержки, выбрала электромотор. По причине хорошей управляемости, отсутствия термонагруженности, простоты, а значит и многократно более высокой НАДЁЖНОСТИ.

Есть ли решение, позволяющее повысить надёжность не снижая эффективности, а в идеале способное и повысить её?

12 июля 2019 г. был выдан охранный документ — «Газодинамический компрессор и реактивный двигатель на его основе» радикально меняющего подход к построению ЖРД.

Но для чего вообще нужно создавать высокое давление в топливной магистрали?

Формула Циолковского показывает, что удельный импульс тем выше, чем выше температура до начала расширения газа и чем меньше отношение давления атмосферы к давлению газа до начала истечения (упрощенно к давлению в камере сгорания). Высокое давление также означает высокую плотность создаваемого

реактивного потока и высокую скорость протекания экзотермической реакции, что напрямую сказывается на габаритах двигателя и его удельной мощности. Таким образом, при отсутствии атмосферы, без высокого давления в камере сгорания как-то ещё можно добиться высокого удельного импульса, но повышенной скорости экзотермической реакции и высокой мощности достичь не удастся.

Для поддержания качественного распыла и сгорания топливных компонентов давление в топливной магистрали должно быть значительно выше давления в камере сгорания. Можно ли использовать энергию реактивного потока для повышения давления в камере сгорания или каких либо реактивных каналах ЖРД уже после прохождения предварительной экзотермической реакции? Можно, если поток разделить на, как минимум две составляющих, дать составляющим потока преобразовать тепловую энергию в кинетическую и столкнуть их между собой. Упрощенно, в этом и состоит идея газодинамического компрессора, концептуальное исполнение которого показано на *рис. 1*.

Двигатель условно делится на основные сегменты, обозначенные как S1, S2, S3, S4, S5. В сегменте S1 происходит смешивание, поджиг и начальное сгорание компонентов топлива, дающее исходную энергию для разгона газовой струи (форсунки подающие топливо и окислитель условно обозначены как Т и О). Сегмент S2

обеспечивает разгон гомогенной газовой струи в дозвуковом режиме $M < 1$. Сегмент S3 обеспечивает разгон газовой струи в сверхзвуковом режиме $M > 1$. Двигатель содержит отдельные секции Se1 и Se2, каждая из которых содержит условные сегменты S1, S2, S3. Секции Se1 и Se2 работают в паре. В сегменте S3 осуществляется слияние под углом газовых потоков парных секций Se1 и Se2. Часть векторов движения газовых потоков в парных секциях Se1 и Se2 являются встречными, и при слиянии потоков происходит резкое нарастание давления и температуры, а также снижение скорости движения газового потока. При слиянии потоков помимо скачка давления, также резко ускоряются, детонационные, диффузионные процессы и экзотермическая реакция. В сегменте S4 происходит окончание экзотермической реакции и выравнивание газового потока. При некоторых вариантах исполнения двигателя, сектор S4 может быть из конструкции исключен. Сегмент S5 — сопло.

Ввиду того, что газодинамическое сжатие потока вблизи центральной оси интенсивности значительно и давление может быть сопоставимо либо превышать давление в смесительной камере, сектора Se1 и Se2 содержащие сегменты S1, S2, S3 совокупно называются ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ КОМПРЕССОРОМ.

Возможно два условных варианта работы газодинамического компрессора предлагаемой конструкции. Первый предполагает, ставшую классической, схему



Rocket Lab представляет углекомпозитную ракету-носитель Electron с первыми в мире, напечатанными на 3d-принтере, двигателями Rutherford, снабжёнными электроприводом топливных насосов

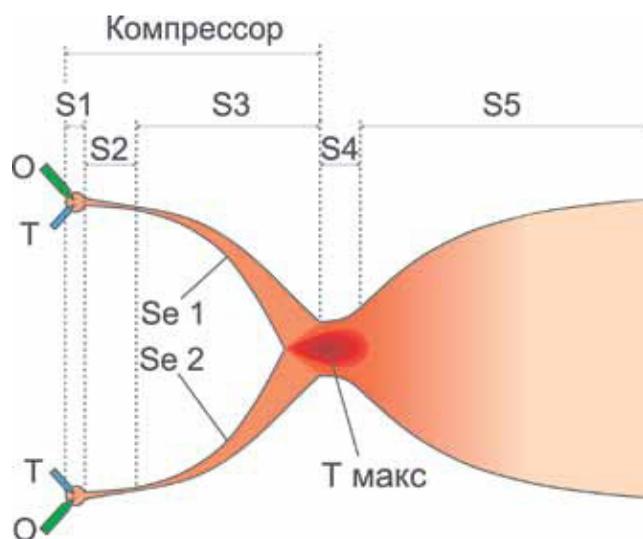


Рис. 1. Идея газодинамического компрессора

сгорания топлива, при которой подаваемые топливные компоненты максимально эффективно реагируют на этапе предварительного смешения и сгорания (т.е. при прохождении S1 и осуществлении первичной экзотермической реакции). Газифицированные потоки разгоняются в сегментах S2, S3, сталкиваются в сегментах S3, S4 и осуществляют вторичную экзотермическую реакцию.

Второй условный вариант работы газодинамического компрессора предполагает схему сгорания компонентов с распределением процесса экзотермической реакции вдоль канала истечения. При этом первичное сгорание компонентов будет распределяться вдоль сегментов S1, S2, S3. Такое распределенное сгорание сопряжено со значительными дополнительными особенностями в конструкции системы эмиссии топливных компонентов, а возможно и их составу, однако дает весомое дополнительное преимущество в виде увеличения эффективности набора кинетической энергии для дальнейшего газодинамического сжатия.

Оба условных варианта работы газодинамического компрессора предполагают достижение максимальных значений температуры и давления – $T_{\text{макс}}$ вблизи центральной оси интенсивности потока при столкновении в сегментах S3, S4.

Ещё раз подчеркнём, что граница между первым и вторым вариантами эмиссии и сгорания топлива является условной, так как топливные компоненты, так или иначе, сгорают в течение определенного времени при движении от форсунки к соплу. Разница первой и второй схемы сгорания, состоит лишь в процентных соотношениях тепловыделения в сегментах S1, S2 и S3.

На рис. 2, а показана диаграмма динамики изменения температуры T , давления P

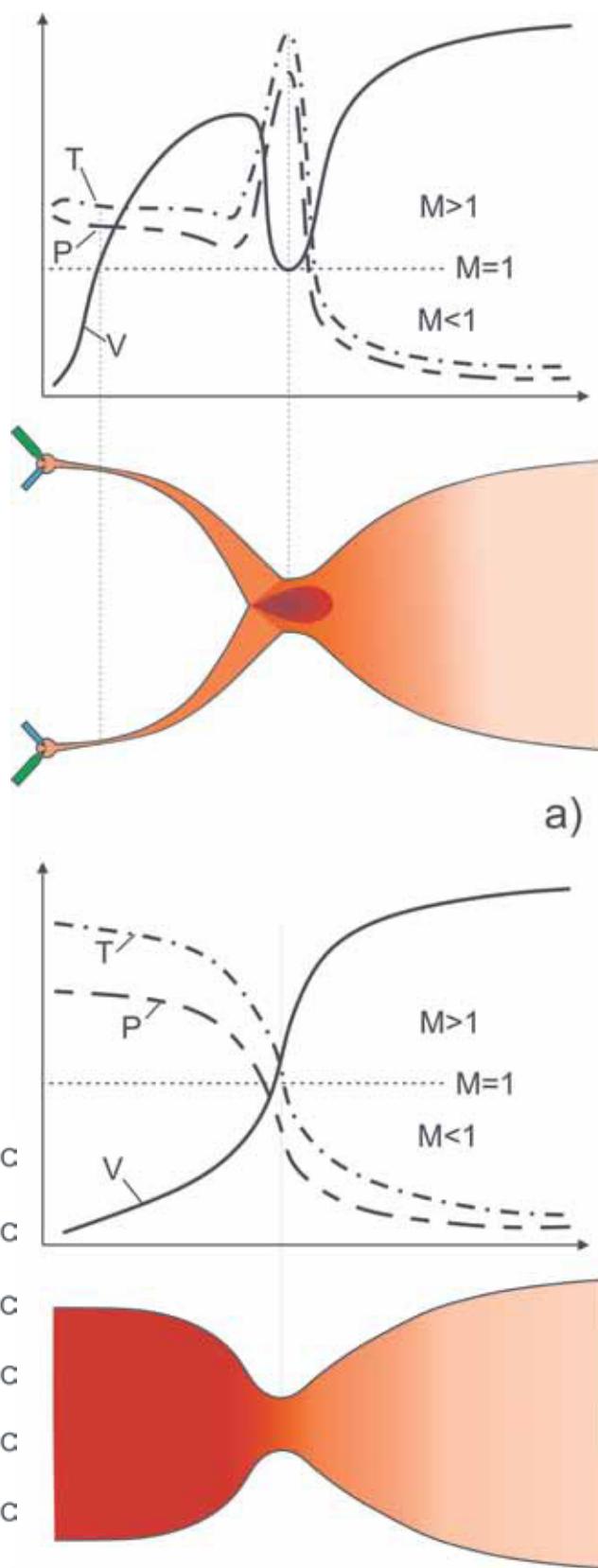


Рис. 2. Диаграмма динамики изменения температуры T , давления P и скорости V , реактивного потока вдоль канала истечения от смесительной камеры к соплу

и скорости V , реактивного потока вдоль канала истечения от смеси-тельной камеры к соплу для предлагаемого решения с газодинамическим компрессором, выполненным по схеме с распределенным сгоранием. Для сравнения, на *рис. 2, б* показана диаграмма камеры сгорания и сопла классической конструкции.

Идея газодинамического компрессора настолько проста, что невольно возникают два вопроса:

1. Неужели до этого ещё никто не додумался?

2. Есть ли в концепции изъян, не позволяющий ей быть эффективной и применимой на практике?

Ответ на первый вопрос, очевидно, стоит искать в истории развития космонавтики. Пробразом газодинамического компрессора является диффузор ПВРД. Первые образцы ТНА для ракет разрабатывались до появления сверхзвуковой авиации и много раньше появления гиперзвуковых ПВРД. Так или иначе, ракетный двигатель с газодинамическим компрессором ранее известен не был.

Переходя ко второму вопросу, давайте разберем весь перечень проблем относительно потенциальной работоспособности газодинамического компрессора. Итак.

а) Насколько сильный прирост давления можно получить с помощью газодинамического компрессора?

Из наличия в конструкции газодинамического компрессора сверхзвукового канала разгона (секции S3), не-

Эскиз ЖРД с газодинамическим компрессором с неявно выраженными секциями и соплом Лаваля

сложно догадаться, что скорость реактивных потоков, относительно каналов истечения, до столкновения будет не меньше скорости звука, хотя степень замедления потока определяется через \cos угла столкновения (угла атаки).

Формулы расчёта замедления показывают, что зависимость степени повышения давления от степени замедления потока носит нелинейный характер. Для повышения давления вдвое потребуется степень за-



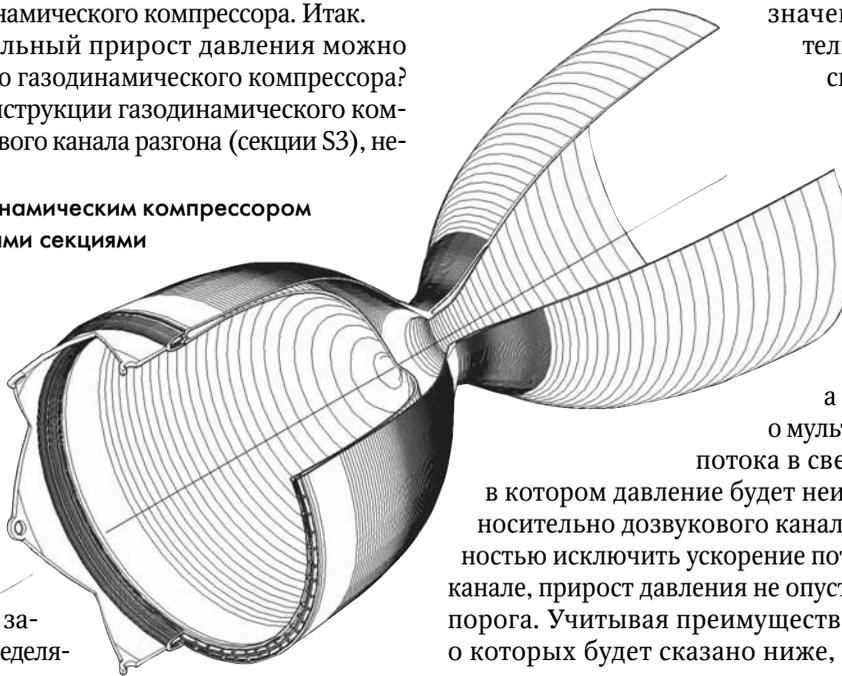
Рис. 3. Зависимость давления от степени M

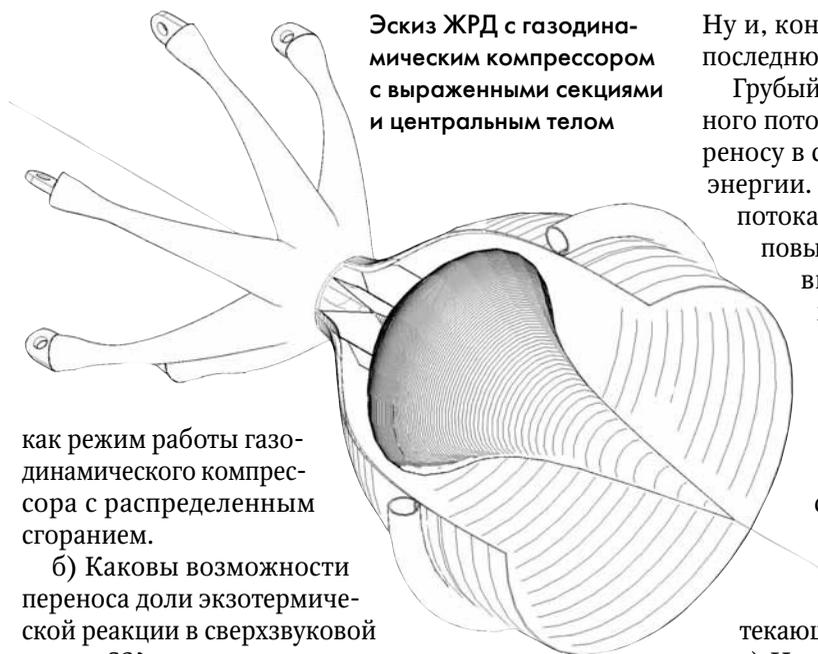
медления реактивного потока на $M=1,047$. Всего на 5% больше скорости звука. Замедление на $M=2$ даст прирост давления уже в 7,82 раза, а на $M=3$ в 36,7 раз! На *рис. 3* показана диаграмма возрастания степени повышения давления от замедления, указанного в M . Вообще же скорости истечения газов из камер сгорания могут достигать 4400 м/с, что, с учётом температуры потока, примерно в пять–шесть раз превышает скорость звука. Указанные расчётные значения будут незначи-

тельно меняться в зависимости от характера используемых топливных компонентов. Конечно, нужно понимать, что поток не получится ни разогнать до предельных значений, ни замедлить до нуля, а также надо помнить

о мультипликации давления потока в сверхзвуковом канале,

в котором давление будет неизбежно снижено относительно дозвукового канала. Но даже если полностью исключить ускорение потока в сверхзвуковом канале, прирост давления не опустится ниже 30%-ного порога. Учитывая преимущества истечения потока, о которых будет сказано ниже, при использовании даже самых примитивных схем газодинамического компрессора, овчинка стоит выделки. Однако имеется возможность значительно повысить скорость потока, не снижая давления, но для этого нужно осуществить максимальный перенос доли экзотермической реакции в сверхзвуковой канал S3, что было упомянуто ранее





Эскиз ЖРД с газодинамическим компрессором с выраженными секциями и центральным телом

как режим работы газодинамического компрессора с распределенным сгоранием.

б) Каковы возможности переноса доли экзотермической реакции в сверхзвуковой сектор S3?

Одно можно сказать определенно — технология сгорания в сверхзвуковом потоке уже существует и успешно используется. Без этой технологии были бы невозможны гиперзвуковые ПВРД, в которых захватываемый поток на протяжении всего рабочего тракта остается сверхзвуковым. При этом относительно газодинамического компрессора, работа гиперзвукового ПВРД изначально находится в менее выгодных условиях. Во-первых, необходимо осуществлять смесеобразование со сверхзвуковым потоком, что в газодинамическом компрессоре делать не обязательно. Во-вторых, гиперзвуковые ПВРД работают в разреженной атмосфере, что существенно снижает возможности ускорения сгорания.

Доля переноса реакции в сверхзвуковой канал будет зависеть от конструктивных особенностей формовки, методов впрыска, формы и размеров каналов.



Изобретатель ракеты на жидком топливе Роберт Годдард (слева) у одной из первых своих ракет. 30-е годы XX в.

Ну и, конечно же, характер топлива будет играть не последнюю роль.

Грубый подсчёт показывает, что ускорение реактивного потока до 2,3–2,5М примерно соответствует переносу в сектор S3 около 10% всей высвобождаемой энергии. При угле атаки в 65 градусов и замедлении потока с 2,4М до 1М давление реактивного потока повысится втрое. Это внушительные, но при этом вполне достижимые значения. К примеру, мощность ТНА РД-170, одного из самых мощных в истории, составляет около 1,35% от общей мощности даже со 100%-м использованием рабочего тела!

Существуют также варианты двух и трёхкомпонентных составов топлива (керосин с взвесьями алюминия, полиэтилена, катализаторов), осуществляющих двух- или трёхфазное сгорание, что даёт возможность добиться экзотермической реакции, протекающей с ускорением.

в) Насколько стабильным и равномерным будет исходящий поток после столкновения?

При столкновении потоков будет осуществляться вторичная экзотермическая реакция, за счёт которой изменятся не только температура, но и характер среды (скорость звука, молярная масса, показатель адиабаты) за счёт чего возникающие неравномерности потока будут подвергаться преломлению, дифракции и интерференции. Таким образом, получаемая волновая структура будет частично сглажена. Зона вторичной экзотермической реакции будет являться своеобразным фильтром, как для возмущений от столкновения, так и для возмущений, поступающих из газодинамического компрессора. Вместе с тем диапазон конструктивных вариантов двигателя весьма обширен и это будет играть очень большую роль в формировании волновой структуры.

Что же в итоге становится лучше в ЖРД с использованием газодинамического компрессора? Улучшается очень многое. Повышается давление реактивного потока, повышаются удельный импульс и мощность, снижается механическая напряжённость топливной магистрали и тепловая напряжённость. При этом двигатель можно разработать гораздо проще, быстрее и он будет многократно надёжнее.

Зона повышенного давления и температуры локализуется в узкой зоне выравнивающего сегмента S4, который можно считать удлинённой горловиной сопла. При этом максимальные давление и температура не достигают стенок горловины, локализуясь в центре интенсивности потока.

Можно сказать, что 12 июля 2019 г. состоялся старт технического перевооружения ракетных двигателей. Очень хотелось бы надеяться, что Россия в этой гонке не окажется в числе догоняющих. При современных технологиях времени на раскачку попросту нет. ■