

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КАМЕРЫ ЖРД С КОЛЬЦЕВЫМ КРИТИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

В.Д. Горохов

Приведен краткий обзор конструкций ЖРД с кольцевым критическим сечением по материалам российских и зарубежных изданий. Показаны преимущества и недостатки ЖРД с кольцевым критическим сечением по отношению к ЖРД с соплом Лавала

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, кольцевое критическое сечение, сверхзвуковое сопло

В настоящее время одной из основных проблем при создании жидкостных ракетных двигателей является получение высокого значения удельного импульса тяги при уменьшении габаритных размеров камеры, в частности сопла.

Одним из путей, позволяющих обеспечить достаточно высокое значение удельного импульса тяги при уменьшении габаритных размеров камеры, является использование вместо обычных круглых сопел Лавала сопел с центральным телом [3]. Отличие между соплом Лавала и соплом с центральным телом состоит в том, что сопло с центральным телом имеет форму критического сечения не круглую, а кольцевую, и, в то время, как сопло обычного ЖРД оптимизировано для определенного режима работы и не может одинаково эффективно работать в широком диапазоне высот и давлений - от старта до выхода на орбиту, двигатель с соплом с центральным телом использует атмосферу, как часть сопла, и поток воздуха сам оптимизирует факел.

При старте летательного аппарата реактивная струя вначале прижата к соплу атмосферным давлением, а затем, по мере подъема, расширяется в стороны. Поскольку газовый поток при обтекании сопла расширяется до давления, близкого к окружающему, то при полете ракеты сопло работает постоянно в режиме, соответствующем максимальному удельному импульсу, что является значительным преимуществом сопла внешнего расширения по сравнению с применяющимися соплами Лавала.

В настоящее время известны следующие схемы сопел с центральным телом (рис. 1) [5]. Сопла для сравнения показаны вместе с камерой сгорания с соблюдением относительных размеров.

Кольцевые сопла позволяют увеличить площадь выходного сечения сопла и разместить часть агрегатов в центральной части, что приводит к уменьшению линейных размеров двигателя.

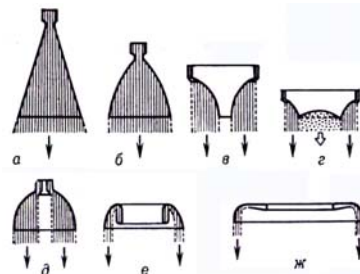


Рис. 1. Типы сопел ЖРД

а - коническое сопло Лавала; б - профилированное сопло Лавала; в - штыревое; г - штыревое аэродинамическое, д - тарельчатое, е - тарельчатое с обратным потоком, ж - тарельчатое с горизонтальным потоком

В связи с этим большой интерес вызывает ЖРД с соплом внешнего расширения, в частности, выполненные по схеме 1в или 1г. (рис. 2). В этом случае сопло внешнего расширения представляет собой профилированное тело, сужающееся по направлению газового потока, похожее на конический или призмобразный сосуд с дном. Камера сгорания на рисунке имеет вид кольца, охватывающего сопло. Внутри сопла располагаются все другие элементы конструкции ЖРД, включая турбонасосный агрегат, что позволяет значительно уменьшить линейные габариты двигателя.

Другим преимуществом сопел внешнего расширения являются их существенно меньшие габариты (они короче обычных сопел в 3-4 раза), что объясняется их газодинамическими характеристиками. Применение сопел внешнего расширения позволяет значительно увеличить удельный импульс и уменьшить габариты ЖРД, не прибегая к увеличению давления в камере свыше 100 атм. К настоящему времени испытаны экспериментальные образцы ЖРД с соплом

внешнего расширения, рассчитанные на тягу примерно от 10 до 100 т. Следует сказать, что создание таких ЖРД представляет немалые трудности для конструкторов и технологов.

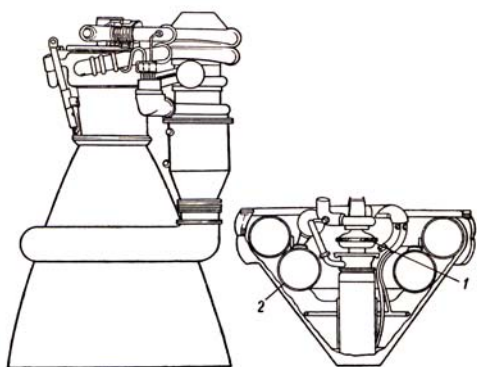


Рис. 2. Камера ЖРД с соплом Лавалья и камера ЖРД с тарельчатым соплом одинаковой тяги
1 - турбонасосный агрегат, 2 - вспомогательные баки

На рис. 3 представлена камера ЖРД с тарельчатым соплом, выполненным по схеме 1ж [3]. В данном тарельчатом сопле кольцевое критическое сечение располагается ближе к оси сопла, что позволяет уменьшить размеры камеры сгорания. Продукты сгорания вытекают из критического сечения, расходясь в направлении от оси.

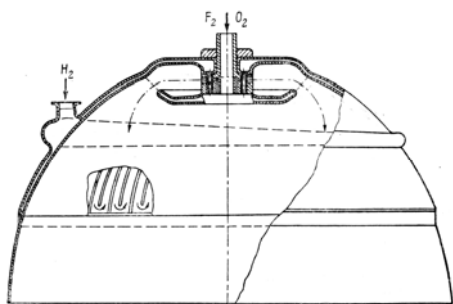


Рис. 3. Камера ЖРД с тарельчатым соплом с горизонтальным потоком

Смесительная головка выполнена в виде цилиндра с цилиндрической огневой поверхностью, внутри которого проходят трубопроводы подачи компонентов в смесительную головку. Камера сгорания представляет собой кольцо, расположенное перпендикулярно к продольной оси камеры и имеющее профилированное поперечное сечение. Боковые поверхности камеры сгорания образованы круговыми плоскими стенками разного диаметра с профилированными периферийными участками.

Центральная часть боковых поверхностей соединена между собой цилиндрическим огневым днищем, а периферийная образует кольцевое критическое сечение. Компоненты подают-

ся в цилиндрическую смесительную головку и перемешиваются на выходе из форсунок. Продукты сгорания по радиальным лучам, перпендикулярным к оси камеры, подаются в критическое сечение, где изменяют направление движения и поступают в сопло.

Основными недостатками данной кольцевой камеры являются значительные диаметральные размеры, связанные с тем, что компоненты и, соответственно, продукты сгорания на выходе из смесительной головки движутся не вдоль оси камеры, а перпендикулярно к ней, изменяя направление своего движения в критическом сечении. Это вызывает уменьшение времени пребывания продуктов сгорания в камере сгорания и не позволяет обеспечить необходимое значение удельного импульса тяги. Кроме этого, плоская профилированная поверхность не позволяет обеспечить достаточно большие давления внутри камеры сгорания из-за возможной потери прочности и устойчивости оболочек тракта охлаждения.

В ОАО «КБ Химавтоматики» (ОАО КБХА) создан кислородно-водородный ЖРД (рис.4), выполненный по безгенераторной схеме, для разгонных блоков и межорбитальных буксиров [2].

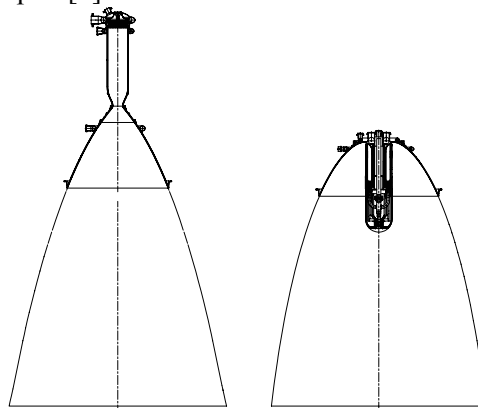


Рис. 4. Камера ЖРД с соплом Лавалья (слева) и камера ЖРД с тарельчатым соплом

В двигателе используется камера принципиально новой конструктивной и газодинамической схемы, а именно: кольцевая цилиндрическая камера сгорания размещена внутри сопла, что позволило значительно сократить линейные размеры. Продукты сгорания поступают от смесительной головки к щелевому критическому сечению, разворачиваются в нем на 180° , и подаются в тарельчатое сверхзвуковое сопло.

Одной из отличительных особенностей данного двигателя является выполнение тарельчатого сопла из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ).

Использование кольцевой камеры с тарельчатым соплом для такого двигателя позволило обеспечить следующие преимущества по сравнению с камерой с традиционным соплом Лавала (рис.4):

- более высокое значение удельного импульса тяги при одинаковой длине двигателя;
- меньшую массу при одинаковых значениях удельного импульса тяги;
- исключение необходимости специальных стендовых устройств (барокамеры и ГДТ) при проведении огневых испытаний в земных условиях [1].

Двигатель (рис. 5, 6) представляет собой сварно-паяную конструкцию, состоящую из тарельчатого сопла 1, кольцевой цилиндрической камеры сгорания 2, расположенной осесимметрично внутри сопла. Основные параметры двигателя приведены в табл. 1.

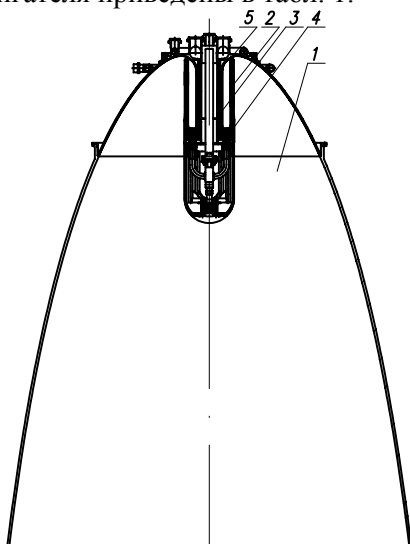


Рис. 5. Камера ЖРД с кольцевым критическим сечением и тарельчатым соплом
1-тарельчатое сопло, 2-кольцевая камера сгорания, 3-охлаждаемый цилиндр, 4-смесительная головка, 5 –критическое сечение



Рис. 6. Камера ЖРД с кольцевым критическим сечением и тарельчатым соплом (макет)

Основные параметры кислородно-водородного двигателя	
Тяга в пустоте, тс (кН)	4 (39,24)
Удельный импульс тяги в пустоте, кгс·с/кг (м/с)	476 (4670)
Давление в камере, кгс/см ² (МПа)	70 (6,86)
Компоненты топлива:	
окислитель	жидкий кислород
горючее	жидкий водород
Масса двигателя, кг	240
Габариты двигателя, мм:	
высота	1600
диаметр среза сопла	1580

Внутри камеры сгорания осесимметрично установлен профилированный охлаждаемый цилиндр 3, один конец которого соединен со смесительной головкой 4, другой - с тарельчатым соплом 1. Тарельчатое сопло 1, профилированная наружная стенка цилиндра 3 и стенка кольцевой камеры сгорания образуют кольцевое критическое сечение 5. Внутри охлаждаемого цилиндра 3 установлены трубопроводы подачи компонентов в кольцевую смесительную головку 4.

Тарельчатое сопло 1 состоит из регенеративно охлаждаемой части и неохлаждаемого насадка из КМ, соединенных между собой при помощи фланцевого соединения.

Система охлаждения двигателя содержит два независимых контура - контур охлаждения цилиндра и контур охлаждения сопла. При работе двигателя компоненты топлива подаются через форсунки смесительной головки 4 в камеру сгорания 2, реагируют друг с другом в камере сгорания и далее поступают к критическому сечению 5. После выхода из критического сечения поток компонентов разворачивается в обратную сторону и подается к срезу сопла. По этим обстоятельствам был рассмотрен вариант нетрадиционного кольцевого тарельчатого сопла. При определении параметров камеры с кольцевым тарельчатым соплом использовались расчетные и экспериментальные материалы ИЦ им. Келдыша [1], [2], а также экспериментальные данные ЦНИИМАШ [3] по исследованию характеристик камеры ЖРД с кольцевым тарельчатым соплом при огневых испытаниях модельной камеры. По данным ИЦ им. Келдыша [2], при одинаковых значениях гео-

метрической степени расширения сопла \bar{F} использование кольцевого тарельчатого сопла вместо круглого сопла сокращает его длину ~ 40%. Данное преимущество следует из особенности профилирования сопел. Так, при профилировании круглого сопла Лавалья на начальном участке разгон газового потока осуществляется при его развороте за критическим сечением как бы около «двух угловых точек».

В кольцевом тарельчатом сопле на начальном участке разгон газового потока осуществляется при его развороте за критическим сечением, которое представляет кольцевой канал, около одной угловой точки. В этом случае, согласно газодинамическим расчетам, угол разворота газового потока может быть более 90° и контур такого сопла на начальном участке является более выпуклым по сравнению с контуром круглого сопла. Наличие тарельчатой части сопла при угле разворота газового потока на угол более 90° позволяет разместить в ней по направлению оси сопла входную часть сопла и собственно камеру сгорания. В этом случае суммарный угол разворота газового потока от зоны горения компонентов топлива у смесительной головки до выходного сечения составляет $\sim 170^\circ$. Подобное расположение собственно камеры сгорания, как показали результаты конструкторских проработок, позволили при длине камеры $L_k=1900$ мм иметь длину сверхзвуковой части сопла $L_c=1840$ мм.

В 1998 г. на стендовой базе КБХА проведен первый этап огневых стендовых испытаний новой камеры (рис.7).

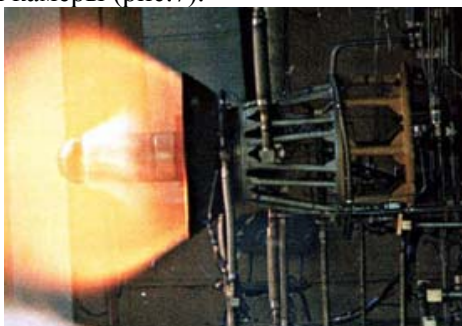


Рис. 7. Огневые испытания камеры ЖРД с кольцевым критическим сечением и тарельчатым соплом

Программа испытаний состояла из 5 пусков, длительностью 20 – 30 сек каждый. Давление в камере сгорания изменялось в диапазоне от 35 до 73 кг/см² при соотношении компонентов топлива $k_m=4,0\div 6,4$.

Испытания проводились на стендовом варианте камеры. Стендовая камера отличалась

от объектовой укороченным сверхзвуковым соплом - отсутствовала неохлаждаемая часть сопла, выполненная из УУКМ. Диаметр среза укороченного сопла составлял 600 мм. При этом расчетное давление продуктов сгорания на срезе в вакууме равнялось 0,03 кг/см².

Огневые испытания стендового варианта натурной кольцевой камеры подтвердили работоспособность и перспективность этого направления отечественного двигателестроения.

Одним из основных достижений, полученных при отработке принципиально новой камеры, явилось подтверждение безотрывного течения продуктов сгорания в сопле данной конструкции.

При расчетном давлении продуктов сгорания в выходном сечении сопла 0,03 кгс/см² отрыва потока в земных условиях не происходило. При этом уровень вибрации сопла имел минимальное значение. Объектовый подогрев водорода в тракте охлаждения обеспечивался в земных условиях без газодинамической трубы и барокамеры. Последнее обстоятельство дает возможность испытывать высотный двигатель на номинальном режиме работы на земле [1].

При работе двигателя с кольцевым критическим сечением в земных условиях, при наличии атмосферы, продукты сгорания топлива после кольцевого критического сечения истекают по поверхности сопла. При этом внутрь кольцевой струи продуктов сгорания попадает окружающий камеру воздух с давлением окружающей среды $P_n \approx 1$ кгс/см², который и прижимает, а не отрывает, продукты сгорания компонентов топлива к поверхности сопла и испытываемых элементов конструкции изнутри по всей линии профиля.

Таким образом, на испытуемый элемент конструкции изнутри действуют продукты сгорания с давлением $P_{пс}$, а снаружи – атмосферный воздух с давлением окружающей среды P_n , причем $P_{пс} < P_n$, что позволяет имитировать натурные условия работы элементов конструкции по силовому нагружению и тепловым потокам.

Конструкция двигателя защищена патентом РФ на изобретение [2].

Аналогичные работы по созданию камер ЖРД с соплами внешнего расширения проводятся и за рубежом.

Одной из основных особенностей проекта LASRE фирмы Rocketdyne (теперь - Boeing North American - Rocketdyne) является используемый линейный ЖРД с внешним расширением (Linear aerospike rocket engines).

Название происходит от английского Aerospike, (сокр. от Aerodynamic spike- аэро-

динамический штырь) - название сопла с центральным телом и экспериментальных ЖРД с этим соплом, разрабатываемых с 1966 американской фирмой «Рокетдайн» (рис. 8, 9) [4].

В ЖРД «Аэроспайк» камера сгорания с горловиной сопла образованы набором одинаковых секций, соединённых с общим выходным участком сопла и питаемых от одного ТНА. Такая секционная камера технологична и удобна в отработке. Исследуются ЖРД типа «Аэроспайк» с кольцевой (тороидальной) камерой сгорания и с линейной.

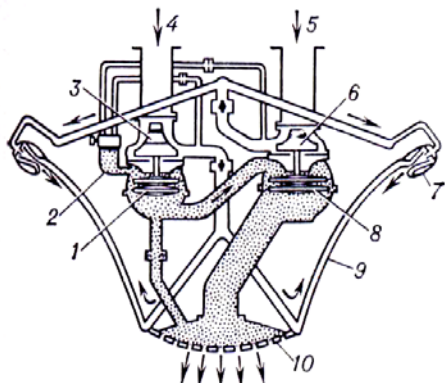


Рис. 8. Схема ЖРД «Аэроспайк»: 1,8- турбина; 2-газогенератор; 3,6- насосы; 4- трубопровод горючего (жидкий водород); 5 – трубопровод окислителя (жидкий кислород); 7- камера сгорания с участком сопла; 9- выходной участок сопла; 10 - перфорированное днище

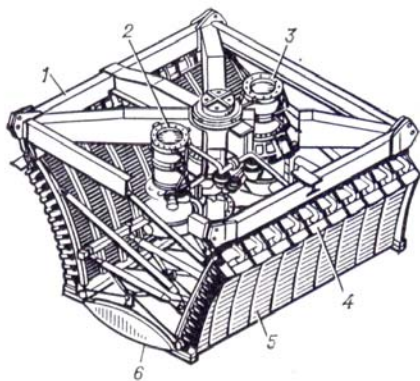


Рис. 9. Экспериментальный «линейный» ЖРД (тяга 1150 кН, высота 2,4 м): 1-силовая рама; 2- турбонасосный агрегат жидкого кислорода; 3- турбонасосный агрегат жидкого водорода; 4 - камера сгорания с горловиной сопла (по 10 с каждой стороны); 5 - выходной участок сопла; 6 - днище

Тягу линейного ЖРД можно варьировать, изменяя число секций в камере; установкой в ряд нескольких линейных ЖРД (модулей) получают РД необходимой тяги. Такой ЖРД «Аэроспайк» хорошо сочетается с космическим аппаратом(КА), корпус которого рассчитан на

создание подъёмной силы. ЖРД «Аэроспайк» рассматривают как двигатели будущих перспективных КА, например, одноступенчатых аппаратов многократного применения. На стендах испытано несколько экспериментальных ЖРД «Аэроспайк» с использованием кислородно-водородного топлива: во 2-й пол. 60-х гг. кольцевые ЖРД «Аэроспайк» тягой до 1,1 МН, в 1-й пол. 70-х гг. – кольцевой «Аэроспайк» тягой 111 кН и линейный тягой 1,15 МН. Получен удельный импульс тяги ЖРД 4460–4630 м/с при давлении в камере 7-8 МПа.

Rocketdyne предложил такой ЖРД для использования на космическом корабле «Space Shuttle», но двигатель был отвергнут, так как технология была признана в то время слишком незрелой.

С тех пор Rocketdyne выполнил 73 лабораторных и наземных испытательных запусков, во время которых двигатель проработал более чем 4000 сек. Rocketdyne потратил более чем \$ 500 миллионов за эти годы для проверки и улучшения технологии ЖРД.

В то время как сопло обычного ЖРД оптимизировано для определенного режима работы и не может одинаково эффективно работать в широком диапазоне высот и давлений - от старта до выхода на орбиту, новый двигатель использует атмосферу, как часть сопла и поток воздуха сам оптимизирует факел.

Линейный ЖРД позволяет осуществлять управление вектором тяги в одной плоскости (по тангажу) без отклонения его оси путем создания разности тяги верхней и нижней половин (до +/-15%).

Это позволяет отказаться от его подвижной подвески. К тому же линейный ЖРД на 75 % меньше обычного с аналогичной тягой, что еще более снижает массу двигателя, корабля и топлива, уменьшая стоимость вывода полезной нагрузки.

В 1997 г. началась серия испытаний линейного двигателя в полете со скоростью от 0,8 до 3М на высотах от 6 до 24 км.

На летающей лаборатории NASA SR-71 #844 (17980/ #2031) был установлен контейнер Linear Aerospike SR-71 Experiment (LASRE). Контейнер длиной 12,3 м представляет собой модель X-33 в масштабе 1:10 с 8 секциями двигателя, газообразным водородом, гелием (для "холодного" запуска) и измерительным оборудованием общим весом 5,8 т (14,300 фунтов). Имеющегося топлива хватает для 2-3 с работы двигателя с тягой до 2800 кг. Общая стоимость программы LASRE - приблизительно \$ 20 миллионов.



Рис. 10. «Революционный» линейный ЖРД «Аэроспайк»

«Революционный» линейный ЖРД «Аэроспайк», созданный в результате работ по программе NASP, проведенных в США, показан на рис. 10.

Таким образом, проведенный анализ имеющейся научно-технической и патентной литературы показал, что до настоящего времени нет созданного и эксплуатируемого ЖРД с соплом внешнего расширения, а основной проблемой в создании камеры с кольцевым критическим сечением являются трудности организации камеры двигателя с таким соплом из-за сильно развитого периметра критического сечения и сложности подвода охладителя.

Необходимо отметить, что трудности охлаждения несколько уменьшаются при использовании тарельчатого сопла.

Также недостаточно полно исследованы и определены такие параметры камеры ЖРД с кольцевым критическим сечением, как обеспечение стабильности его размеров при работе двигателя, его прочность и устойчивость, охлаждение камеры и тарельчатого сопла и др.

Несмотря на вышеперечисленные проблемы, необходимо отметить, что технические решения по созданию камер с соплами внешнего расширения открывают большие возможности по разработке двигателей с саморегулируемыми кольцевыми соплами. Появляется возможность плавного регулирования тяги двигателя и степени расширения сопла по траектории полета, что существенно улучшает их энер-

гетические характеристики, однако практическое использование такого способа в ракетном двигателестроении до настоящего времени сдерживается сложностью обеспечения работоспособности центрального тела, элементов камеры, образующих кольцевое критическое сечение и отсутствием экспериментальных данных по эффективности его применения.

Применение кольцевых камер в перспективных двигателях с большой степенью расширения сверхзвукового сопла (вторые и третьи ступени, разгонные и орбитальные блоки) позволит существенно уменьшить длину двигателей и на 30 – 40% снизить их массу при максимальных значениях удельного импульса и существенно упростить проведение огневых испытаний за счет исключения использования барокамеры и ГТД.

Литература

- 1 Братухин Н.А., Горохов В.Д., Лобов С.Д., Мигдаль С.М., Орлов В.А., Черниченко В.В. Газодинамическое испытательное устройство. Патент РФ № 2239085, ОАО КБХА, Воронеж, 2004.
- 2 Горохов В.Д., Лобов С.Д., Орлов В.А., Черниченко В.В. Камера жидкостного ракетного двигателя. Патент РФ № 2151318, ОАО КБХА, Воронеж, 2001.
- 3 Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. Учебник для вузов. М., Машиностроение, 1968, 396с.
- 4 Космонавтика. Энциклопедия. Под ред. Глушко В.П. М.: Сов. энциклопедия, 1985.-528 с., ил., 29 л.илл.
- 5 Левин В.Я. Испытания жидкостных ракетных двигателей. Учеб. пособие для авиац. специальностей вузов, И.: Машиностроение, 1981, 280 с.
- 6 Рачук В.С. КБХА нацелено на разработку двигателей XXI века. Журнал «Вестник авиации и космонавтики», 01, 2002, стр. 56
- 7 Aviation stock in demand. — Interavia Air Lett., 1958, N 4054, p. 1.
- 8 Fluorine rocket. — Aeroplane and Astronaut., 1960, N 2555, p. 508.
- 9 Interavia Air Lett., 1960, N 4587, p. 6.
- 10 McGuire F.G. STL/Bell Draco could fill pre-Saturn booster gap. - Missiles and Rockets, 1961, 9, N 14, p. 24–25.
- 11 Low mixture ratio fluorine/hydrogen propulsion system investigation. - AIAA Bull., 1965, 2, N 5, p. 211.

Воронежский государственный технический университет

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF THE CREATION LRE'CAMERA WITH RECIRCULATING CRITICAL SECTION, LOCATED IN SUPERSONIC NOZZLE

V.D. Gorohov

The brought design LRE with recirculating critical section on material russian and foreign publishing. Advantage and defect LRE with recirculating critical section to LRE with Laval nozzle are shown

Key words: Liquid rocket engine, recirculating critical section, supersonic nozzle