

А. Б. Бачурин, А. М. Русак, Е. В. Стрельников, В. А. Целищев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В РЕГУЛИРУЕМЫХ СОПЛАХ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Рассмотрены результаты исследований особенностей течения в регулируемых соплах с центральным телом ракетных двигательных установок. Показано влияние различных форм регулируемых сопел и форм центральных тел ракетных двигателей на газодинамические параметры. *Сопло; регулируемые сопла; газодинамические параметры; центральное тело*

Сопловые блоки регулируемых двигательных установок играют исключительно важную роль: в них производится разгон газового потока, создается основная часть тягового усилия двигателя. Перекладка регулятора сопла во многом определяет переходные процессы двигательных установок (ДУ), потери в сопле во многом определяют КПД ДУ. Необходимо отметить сложность и неоднозначность процессов, протекающих в соплах регулируемых ДУ, их зависимость как от внешних характеристик – внешнего давления, высоты и скорости полета летательного аппарата, так и от внутренних характеристик регулируемой ДУ[3].

Известно, что сопло, как и большинство газодинамических устройств, с максимальной эффективностью работает на одном режиме или в очень узком диапазоне изменения характеристик. Для сопел маршевых двигателей, имеющих практически неизменные параметры, разработаны весьма точные расчетные методы оценки их характеристик и профилировки. Достаточно сказать, что газодинамические параметры рассчитываются с точностью до 1–0,5%, а координаты оптимального профиля с точностью до 0,001 м. Выгорание теплозащитного покрытия на поверхности раструба сопла ухудшает коэффициент тяги сопла на несколько процентов. В регулируемом же двигателе диапазон расхода газа может меняться в 20–50 раз,

при этом может измениться в несколько раз камерное давление.

Задача несколько упрощается, когда речь идет о высотных ступенях или головной части ракеты, осуществляющей полет в космическом вакууме, однако современные головные части баллистических ракет могут осуществлять подход к цели на относительно малых высотах со скоростью, превышающей звуковую в 3–6 раз. В этом случае при работе регулируемой ДУ на срезе сопла имеется противодавление в 0,2–0,4 МПа, что еще более усугубляет задачу создания эффективных регулируемых сопловых блоков. Примерно такая же задача возникает при разработке регулируемого двигателя для активно-реактивного снаряда – АРС. Траектория такого снаряда проходит на высотах 0–15–20 км и противодавление на срезе сопла меняется от 0,1 до 0,001 МПа. Во всех известных сегодня регулируемых клапанах и соплах различных схем в роли регулятора выступает изменяемое минимальное (критическое) сечение сопла, а это, даже при условии сохранения давления в камере сгорания постоянным, меняет соотношение $F_{кр} / F_{ср} = q(\lambda)_{ср}$ и соответственно меняет газодинамические характеристики всего тракта сопла.

Таким образом, можно отметить основные особенности функционирования сопел регулируемых двигательных установок:

- переменное геометрическое соотношение $F_{кр} / F_{ср}$ на различных режимах, следовательно, переменные газодинамические параметры в одной и той же точке тракта сопла, в том числе и на его срезе;
- переменная высотность сопла; возникновение изменяемого противодавления среды в процессе полета ЛА;
- возможность возникновения отрывных зон в сверхзвуковой части сопла (как результат

Контактная информация: (347) 273-06-35

Исследования выполнены в соответствии с планом работ по государственному контракту № ПЗ17 «Электрогидравлические системы управления регулируемой двигательной установки твердого топлива многократного включения» Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

нерасчетного течения из-за изменяемого противо-давления);

- возможность появления струйных и кусочно-однородных течений и дозвуковых зон;
- возможность несовпадения звуковой линии с критическим сечением;
- изменение интегральных характеристик, в том числе коэффициента расхода сопла.

В то же время к соплам РДУ предъявляются еще некоторые специфические требования, в том числе:

- поддержание линейной зависимости расхода газа или тяги, в зависимости от перемещения регулируемого органа;
- поддержание линейной зависимости усилия привода регулятора при его перемещении;
- сохранение точки приложения и направления вектора тяги сопла в процессе регулирования.

Рассмотрим, как отвечают известные технические решения сформулированным требованиям.

Использование круглых сверхзвуковых сопел в условиях сильно меняющихся противо-давлений и камерного давления двигателя приводит к значительным потерям тяги. Основные недостатки сопел Лавалья, связанные с их большой длиной и низкой эффективностью при расширении потока, еще более ощутимы при больших степенях геометрического расширения $F_{кр} / F_{ср}$. При работе высотных сопел на высотах значительно меньших расчетной, как правило, возникают пульсации газового потока вследствие отрыва его, что приводит к интенсификации теплообмена и создает опасность разрушения сопла внешним давлением.

В последние годы широко используются сопла Лавалья с выдвигной приставкой для уменьшения потерь из-за перерасширения, но это решение ведет к усложнению конструкции самого сопла, требует дополнительных агрегатов на борту летательного аппарата и практически неприемлемо для регулируемых сопел.

Весьма перспективными для уменьшения потерь в нерасчетных режимах и в определенной степени по габаритно-весовым характеристикам являются сопла внешнего расширения разных типов в соответствии с рис. 1. При прочих равных условиях длина кольцевого сопла в два раза меньше длины сопла Лавалья, а потери тяги из-за перерасширения значительно меньше.

Оценка различных сопел по коэффициенту тяги представлена на рис. 2, из которого видны

преимущества кольцевых сопел на нерасчетных режимах.

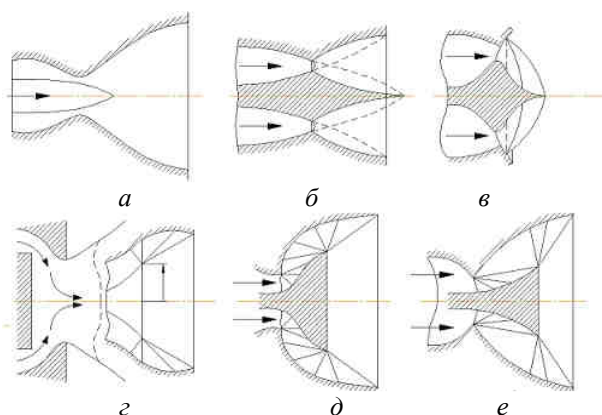


Рис. 1. Некоторые схемы сопел ракетных двигателей: а – сопло Лавалья; б – кольцевые сопла с двойным расширением; в – кольцевые сопла с положительным наклоном критического сечения; з – регулируемое сопло-очко; д, е, ж – тарельчатые сопла с одинарной и двойной угловыми точками

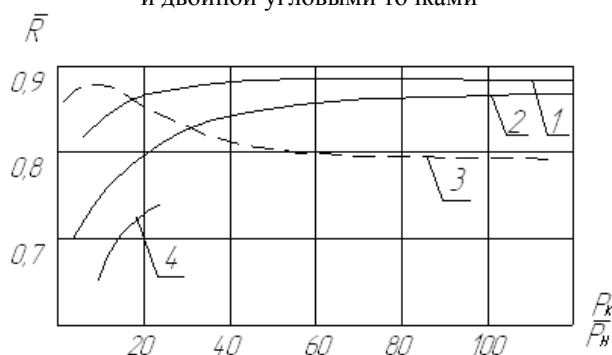


Рис. 2. Сравнительная тяговая эффективность сопел: 1 – кольцевое сопло, $M_c = 3,7$; 2 – сопло Лавалья, $M_c = 3,4$; 3 – сопло Лавалья, $M_c = 2,0$; 4 – плоская тарель

Здесь \bar{R} – коэффициент тяги, представляющий собой отношение действительной тяги сопла к тяге идеального сопла, имеющего на срезе равномерный поток газа вдоль оси, P_k, P_n – соответственно давление в камере сгорания и давление окружающей среды. По сравнению с другими соплами наибольший коэффициент тяги имеют кольцевые сопла типа б (см. рис.1), так как у них воздействие внешнего давления осуществляется на весь контур. На рис. 3 представлено типичное распределение статического давления p , отнесенное к давлению торможения p^* . Переменное давление на центральном теле вызвано отражением чередующихся волн разрежения и сжатия от границы струи и тела, характерным для нерасчетных режимов.

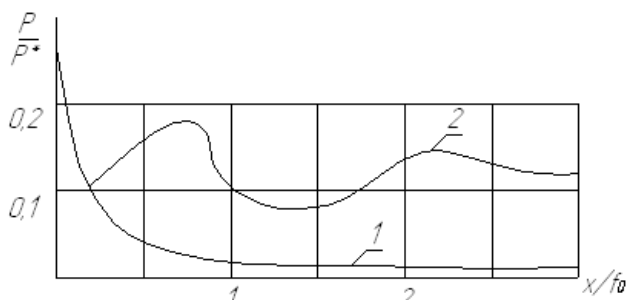


Рис. 3. Давление на центральном теле кольцевого сопла: 1 – расчетный режим; 2 – нерасчетный режим

Расчет течения в кольцевых соплах на нерасчетных режимах представляет весьма сложную задачу. Это связано с тем, что определяющее влияние на этих режимах имеют вязкие эффекты и течения в отрывных зонах, пока что не поддающиеся достаточно строгому описанию.

Внимание исследователей в последнее время привлекают так называемые тарельчатые сопла, представленные на рис. 1, δ , ε . Выполненные в НИИТП подробные исследования газодинамики этих сопел показали, что их применение для маршевых двигателей существенно улучшает тяговые характеристики. На рис. 4 представлены характеристики тарельчатого сопла в сравнении с круглым профилированным соплом Лавалья. Заметны более высокие показатели тяги при использовании тарельчатого сопла внешнего расширения особенно на нерасчетных режимах, которые как раз и характерны для регулируемых сопловых блоков.

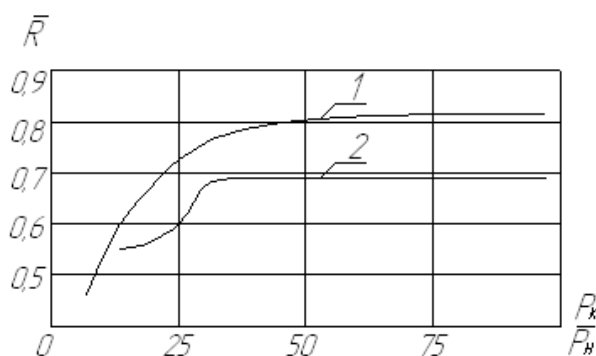


Рис. 4. Тяговая эффективность сопел: 1 – тарельчатое сопло внешнего расширения; 2 – сопло Лавалья

В одномерной постановке звуковая линия обычно предполагается прямолинейной, однако при исследовании тарельчатых сопел наблюдалась картина течения при существенной неравномерности потока в сверхзвуковой части сопла, вплоть до появления дозвуковых зон и срывов, что для расчетных сопел указывает на значительную непрямолинейность звуковой ли-

нии. Стремление к дальнейшему сокращению габаритов сопла привело к идее тарельчатых сопел с двойной угловой точкой.

В тарельчатых и кольцевых соплах, кроме отрывных явлений на нерасчетных режимах, имеет место еще и неоднозначная структура течения в донной области. Так, на рис. 5 показано возможное наличие двух режимов течения в тарельчатом сопле – автомодельного и неавтомодельного. Автомодельный режим соответствует «запуску» донной области, неавтомодельный – «незапуску». При неавтомодельном режиме внешние воздействия проникают в донную область. Размеры ее существенно больше размеров при автомодельном течении.

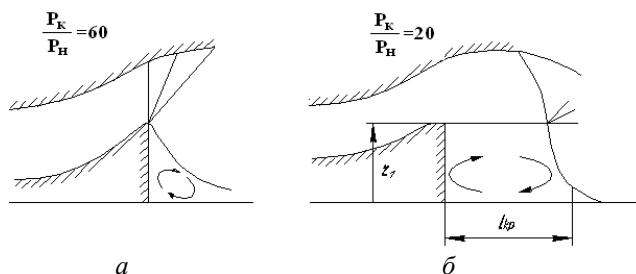


Рис. 5. Два режима течения в тарельчатом сопле: автомодельный (а); неавтомодельный (б)

Так как неавтомодельный режим течения возникает за счет падения скачка уплотнения с кромки сопла в донную область, то размеры донной области обычно больше структуры, образовавшейся при автомодельном течении. Поэтому размер донной области определяется диаметром d_T днища тарели (и параллельными или малой конечностью) на длину $l_{н.р}$ – расстояние от торца тарели до точки торможения в донной области. Это расстояние, как показывают экспериментальные результаты, зависит от геометрии тарели и степени нерасчетности течения $n = p_k / p_n$ и для регулируемых сопел изменяется в очень широком диапазоне – от $1 r_T$ до $4-5 r_T$.

На автомодельном «запущенном» режиме течение в донной области тарельчатого сопла представляет собой обычное донное течение со сверхзвуковой скоростью внешнего потока.

В закрытой зоне за тарелью на ее торец набежит обратная струя, и в этом случае параметры в донной зоне могут определяться как для течения с взаимодействием струи и преграды.

Основным отличием, имеющим особое значение для сопел переменной геометрии и сопел, работающих в составе двигателей с переменным

давлением, является неоднозначность статического давления газа на обечайке сопла, устанавливаемая при выходе на автомодельность с увеличением и уменьшением степени расширения сопла n . Как показано на рис. 4, статическое давление, определяющее уровень тяги при одном и том же $n = p_k / p_n$, может быть существенно различным.

Очень часто схема газораспределения в регулируемых РДТГ выполняется подобно представленной на рис. 6. То есть в схеме имеется центральный регулирующий клапан (реже два), управляющий рабочим процессом двигателя, а сопла представляют собой нерегулируемые объекты, работающие по релейной схеме.

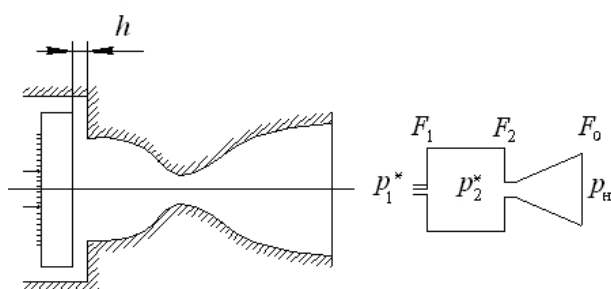


Рис. 6. Сопло Лаваля с клапаном в предкамере и расчетная схема

Особенно часто такая схема газоразведения встречается тогда, когда один газогенератор работает на два или три канала управления: крен, тангаж, рыскание – с примерно близкими потребными тягами. Очевидно, что в тех случаях, когда тяги в одном сопле по циклограмме отличаются в 3–10 раз, такие сопла также становятся неэффективными.

Сами регулирующие элементы – клапаны представляют собой самостоятельный предмет исследования, которому посвящено много работ. Однако и здесь существует еще достаточно нерешенных задач, таких как точное определение действующих газодинамических сил на затвор клапана, обеспечение линейности расхода и усилий и т. д. Фактически все задачи, сформулированные выше по отношению к соплам, также приложимы к клапанам (исключая требования к качеству сверхзвукового потока). В то же время система, состоящая из клапана – проточного тракта и сопла, характеризуется особенностями характеристик. Рассмотрим некоторые аспекты ее работы.

Возьмем сверхзвуковое сопло, критическое сечение которого является выходным дросселем проточного тракта. При этом входным дросселем является регулируемый клапан, представленный на рис. 7. Наличие узла регулирования

в предсопловом объеме существенным образом сказывается на тяговых характеристиках сопла.

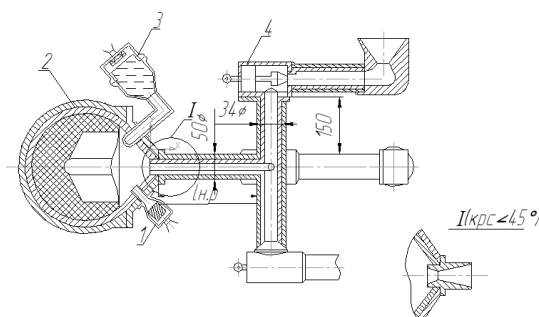


Рис. 7. Принципиальная конструктивная схема РДУ: 1 – узел запуска; 2 – камера сгорания; 3 – узел гашения; 4 – клапан режима (4 шт.)

Рассмотрим особенности работы узла регулирования с проточной камерой. На схеме, приведенной на рис. 6, обозначены:

F_1, F_2, F_{cp} – площади проходных сечений первого, второго дросселя и среза сопла;

p_1^*, p_2^*, p_n – давления на входе в 1 и 2 дроссели и давление внешней среды. В такой камере возможны четыре различных сочетания режимов истечения через входной и выходной дроссели 1 и 2:

- 1) докритическое истечение через оба дросселя (Д-Д);
- 2) надкритическое истечение через дроссель 1 и докритическое истечение через дроссель 2 (Н-Д);
- 3) докритическое истечение через дроссель 1 и надкритическое через – 2 (Д-Н);
- 4) надкритическое истечение через оба дросселя (Н-Н).

Для расчета тяговой характеристики сопла необходимо получить уравнение статической характеристики проточного тракта [1] Для этого используется уравнение неразрывности при допущениях, что термодинамический процесс изменения состояния газа в камере является изотермическим, а процесс истечения через дроссель – адиабатным.

Уравнения статических характеристик проточной камеры с учетом указанных допущений для наиболее вероятных режимов Н-Н и Д-Н имеют вид:

- для режима Н-Н $p_2^* = p_1^* F_1 / F_2$;
- для режима Д-Н $p_2^* = p_1^* / (1 + F_2^2 / 4F_1^2)$.

Отношение F_1 / F_2 является переменной величиной. Для случая тарельчатого регулирующего элемента удобнее пользоваться другой переменной величиной \bar{h} , эквивалентной F_1 / F_2 .

Как следует из рис. 6, $F_1 = \pi d_2 h$, $F_2 = \pi d_2^2 / 4$, где d_c , d_2 – диаметры седла клапана и горла сопла.

Приравняв F_1 и F_2 , получим $h_{\text{ЭКВ}} = d_2^2 / 4d_c$. Обозначив $\bar{h} = h/h_{\text{ЭКВ}}$, перепишем уравнения статических характеристик с учетом \bar{h} :

- режим Н-Н $p_2^* = p_1^* \bar{h}$;
- режим Д-Н $p_2^* = p_1^* / (1 + 1/4\bar{h}^2)$.

Произведем оценку тяговой характеристики сопла с регулирующим элементом в предсопловом объеме.

Тяга сопла без отрыва потока

$$R = Mw + (p_c - p_H)F_c.$$

Тяга сопла с отрывом потока

$$R_{0,\text{тр}} = (Mw_1 + p_i F_i) + 0,55(p_i + 0,95p_H) \times (F_{0,95} - F_i) - p_H(0,975F_{0,95} - 0,025F_c),$$

где

$$p_i = p_H \frac{2}{3} \left(\frac{p_i^*}{p_H} \right)^{-0,2};$$

$$F_{0,95} = F_i - F_{\text{кр}} / 2,4 + F_i.$$

Уравнение статической характеристики проточной камеры

- режим Н-Н $p_2^* = p_i^* h$;
- режим Д-Н $p_2^* = p_1^* / \left(1 + \frac{1}{4h^2} \right)$.

Уравнение расхода

$$M = \mu m p_2^* \frac{F_{\text{кр}}}{\sqrt{T_2^*}},$$

где

$$m = \left[k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{R} \right]^{0,5}.$$

Когда газоструйное устройство работает в импульсном режиме, потери на дросселе будут зависеть от времени закрытия (открытия) клапана. Если время перехода клапана от одного крайнего положения до другого мало по сравнению с длительностью импульса, то потери, связанные с наличием дросселя, также малы.

Высотная компенсация, характерная для сопел внешнего расширения, их способность к меньшему ухудшению характеристик на нерасчетных режимах, а также малые и особо малые расходы некоторых регулируемых двигателей специального назначения, например, как

двигатели крена с малой потребной тягой и расходом газа, стимулировали наши исследования в области сопел, представляющих собой один элемент – сектор кольцевого сопла, представленный на рис. 8.

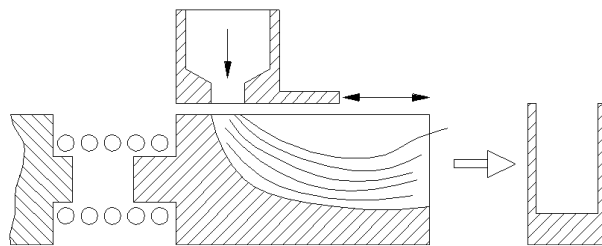


Рис. 8. Плоское сопло

Эти сопла обладают рядом преимуществ – у них строго линейная зависимость между смещением регулирующего элемента – заслонки и площадью критического сечения, технологически реализуемый контур центрального тела, другие положительные свойства сопел с центральным телом. Наличие боковых стенок, повышающих потери на трение, не ведет к большим потерям импульса из-за чрезвычайно малых расходов (потерю импульса можно компенсировать запасом 50–100 гр. рабочего тела на весь цикл работы ДУ).

Тяговые характеристики двигательной установки во многом зависят от правильной организации рабочего процесса в соплах. Если регулятор давления должен в основном соответствовать системе автоматического управления, то регулируемое сопло, кроме этого, должно еще обеспечивать максимально высокий удельный импульс, что является одним из основных требований ко всем типам двигательных установок. Однако сегодня рабочие процессы в регулируемых соплах изучены далеко не достаточно, причиной этого, на наш взгляд, является как сравнительно недавняя, по крайней мере для РДТТ, постановка этой задачи, так и многовариантность возможных решений.

Многовариантность эта определяется в первую очередь конструктивными особенностями регулируемых сопел: различные формы центральных тел, образующих переменное критическое сечение, переменную диффузорность (по давлению) по мере раскрытия критического сечения, при неизменном геометрическом угле выходного раструба, возможное различное противодавление на срезе сопла (вакуум или плотные слои атмосферы – тот и другой режимы полета возможны для одной и той же РДУ) и еще ряд переменных величин. Для оценки характеристик РДУ, особенно ее динамических харак-

теристик, точное определение параметров сопловых блоков весьма актуально. Особенно остро встает эта задача для перерасширенных нерасчетных сопел, работающих в условиях повышенного противодавления, например, на нисходящей ветви траектории летательного аппарата.

Эти вопросы требуют проведения отдельных исследований. Целью этих исследований являлось: экспериментальное изучение газодинамики течения в регулируемых соплах некоторых конкретных (наиболее часто предлагаемых для реализации) конфигураций; определение некоторых интегральных характеристик – коэффициент расхода, относительная тяга этих сопел; определение параметров силового воздействия газа на регулирующий элемент, экспериментальная проверка характеристик перспективных сопел. Исследования регулируемых сопел проводились по нескольким направлениям [2]. Для типичного случая: клапан-сопло с регулирующим узлом в виде центрального тела и внешним коническим раструбом – проводились теневые съемки течения на приборе Теплера, представленном на рис. 9, для этих же клапанов измерялось поле давлений на срезе сопла.

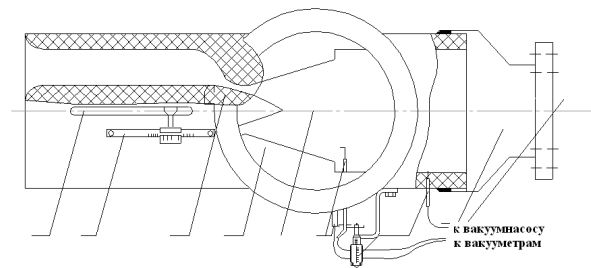


Рис. 9. Экспериментальная установка для исследования характеристик течения в сопле с центральным отоплением

На плоской модели было произведено исследование некоторых физических аспектов течения газа в соплах с регулируемым критическим сечением, причем центральное тело (регулирующий элемент сопла) имело различные геометрические формы – сфера, конус с центральным углом – плоская тарель. Формы исследованных центральных тел представлены на рис. 10.

Внешнее сопло во всех случаях было одинаковым и представляло собой конус с центральным углом раскрытия равным $\alpha = 40^\circ$. Исследования проводились в камере Эйфеля, степень разрежения газа (воздуха) в экспериментах изменялась от 78 до 81%, что составляет $\pi(\lambda) = 0,2$ и, соответственно, для расчетного сопла $\lambda \sim 1,5$

и число $M \sim 1,7$. В исследуемом сопле выходное сечение $f = 30$, критическое сечение расчетного сопла в этом случае определяется как:

$$\pi(\lambda) \rightarrow q(\lambda) \rightarrow f_{кр}.$$

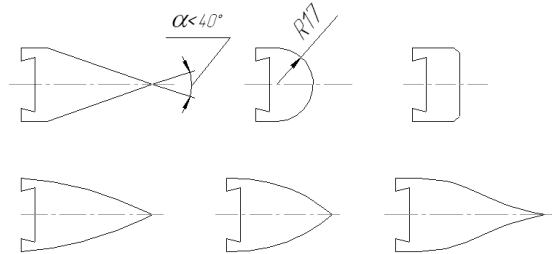


Рис. 10. Формы исследованных центральных тел

Для плоского сопла f_c и $f_{кр}$ определяются одной величиной – величиной поперечного сечения – в эксперименте соответственно 30 мм – срез сопла и 22,5 мм – расчетное критическое сечение. Все рассмотренные регулируемые клапаны имели значительно меньшее $f_{кр}$ и, соответственно, большее число M на срезе сопла, чем расчетное сопло для условий эксперимента. Во всех случаях течения в сопле реализован отрыв потока. Точка отрыва l_T – место отрыва в сопле определялось по методике А. А. Шишкова:

$$\frac{d_T}{d_{кр}} = 1 + 0,33^k \left(\frac{p}{p_{ср}} - \frac{1}{\pi(\lambda)_{кр}} \right)^{0,6}.$$

Входное отверстие сужающейся части сопла равнялось 15 мм.

Необходимо отметить, что известные исследования отрыва в сверхзвуковых соплах проводились для сопел с тщательно профилированным входом при постоянном критическом сечении сопла. Наличие сходящихся сверхзвуковых потоков за критическим сечением, потоков, направление вектора скорости которых формируется профилем центрального тела, создает совершенно иные (чаще неблагоприятные) условия для течения в сопле и приводит к более раннему отрыву потока и соответственно усугубляет неравномерность профилей осевой скорости в сопле.

Параллельно с визуализацией картины течения в макетах клапанных устройств производилось измерение полей скорости газа на срезе сопла. Профили скорости пересчитаны через критерий $\lambda = \frac{v}{a_{кр}}$, где $a_{кр}$ – скорость звука

в критическом сечении – во всех экспериментах постоянна, так как все эксперименты проводи-

лись при практически постоянной температуре рабочего газа. Полученные результаты, представленные на рис. 11, 12, 13, достаточно информативны. Как и следовало ожидать после анализа визуализированных течений, в регулируемых соплах имеется сильная неравномерность потока. При малых открытиях критического сечения расчетное число Маха по отношению площадей – 3,86, а реализуемый перепад давления позволял получить число $M = 1,7$ или $\lambda = 1,5$. Видно, что во всех соплах со вставками сфера, тарель, конус, профилированный конус, при больших открытиях критического сечения реализуется $\lambda = 1,5$ и для сферы ($x = 20$ мм), профилированного конуса ($x = 23$ – 38 мм) имеем практически (с отклонением до 5%) равномерное поле скоростей на срезе сопла. Иное дело при малых раскрытиях критического сечения сопла. В этом случае осуществляется струйное течение с отдельными сверхзвуковыми и дозвуковыми структурами. Для тарели и сферы сверхзвуковой поток реализуется по центру сопла, дозвуковая область занимает периферию соплового среза. Для профилированного конуса провалы профиля скоростей еще более значительны и сложны. Здесь структура потока при малых x имеет два максимума – на оси сопла и примерно на $1/2$ радиуса. Коническое центральное тело определяет наиболее полный профиль скоростей с максимальной неравномерностью в 20% – для профилированного конуса эта неравномерность достигает 60–65%.

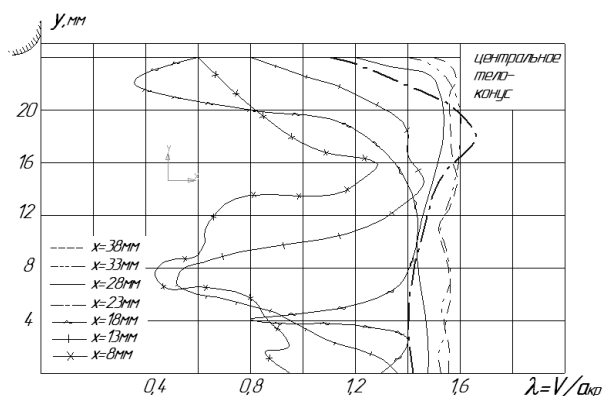


Рис. 11. Измеренные поля скоростей в коническом сопле при перемещении центрального тела (конус)

Из силовых характеристик исследовалось распределение статического давления по профилю центрального тела – параметр, определяющий мощность привода и потребные развиваемые усилия. Из значительного экспериментального массива выбраны точки с точно фиксированным x – раскрытием критического сече-

ния – или, что то же, перемещением центрального тела от нулевого (закрытого) положения и с примерно одинаковым давлением в предсопловом объеме. В качестве центральных тел использовались плоская тарель, конус, сфера.

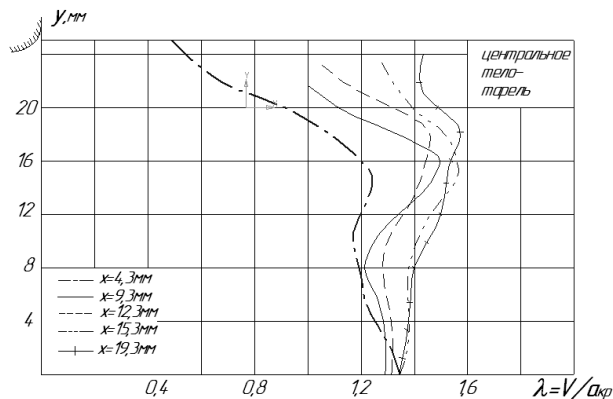


Рис. 12. Измеренные поля скоростей в коническом сопле при перемещении центрального тела (плоская тарель)

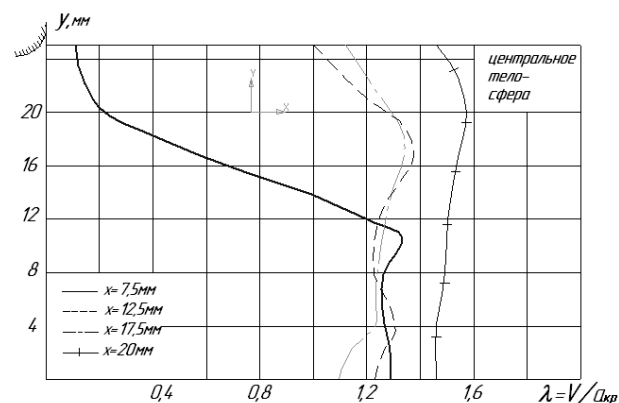


Рис. 13. Измеренные поля скоростей в коническом сопле при перемещении центрального тела (сфера)

Рассмотрим некоторые результаты. На рис. 14 представлено распределение давления по поверхности плоской тарели, используемой в качестве центрального тела. В исследуемом сопле течение газа организовано следующим образом: газовый поток выходит из кольцевой щели на периферии сопла и движется по радиальным направлениям к центру тарели. В то же время существует и пространственное течение вдоль оси сопла с огибанием угловой точки внешней обечайки.

На окружности тарели отмечается давление, совпадающее с камерным, так как скорость газа там еще мала. После прохождения звуковой линии, примерно на расстоянии 0,82 тарели поток продолжает разгоняться, двигаясь параллельно плоскости тарели и одновременно разворачиваясь вдоль осевого направления сопла, давление на поверхности тарели продолжает падать до

минимального – в некоторых экспериментах давление достигает атмосферного и ниже. На оси тарелки, где в одну область (точку) сходятся радиальные (направленные внутрь) течения, снова наблюдается рост давления, радиальная составляющая скорости падает до нуля и наблюдается отток всей массы газа в осевом направлении.

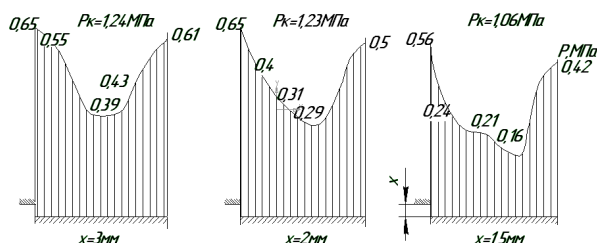


Рис. 14. Распределение давления по поверхности тарелки – регулятора расхода в сопле Лавали

Особенностью этого центрального тела является совпадение направления составляющей результирующей силы статического давления на поверхность центрального тела с направлением усилия привода перемещения центрального тела. Интегрирование давления на поверхности тарелки (численное на ЭВМ или графическое) позволяет определить усилие, действующее в осевом направлении, т. е. непосредственно на привод центрального тела.

Исследованиями силовой картины воздействия на тарель и газодинамическими характеристиками безраструбного сопла – плоская тарель занимался ряд авторов. Среди них можно отметить подробное исследование газодинамических характеристик агрегата, выполненное в НИИТП М. А. Карташевым под руководством В. П. Грязнова, где однозначно показана низкая эффективность такого сопла по сравнению с круглым соплом Лавали и этот результат теоретически обоснован (для нерегулируемого случая). Как и предполагалось, установка центрального тела на тарелки значительно повышает тяговую эффективность сопла, в то же время картина силового воздействия на регулятор клапана усложняется.

Рассмотрим картину течения для центральных тел пространственной конфигурации – в данном эксперименте сфера и конус. На рис. 15 показано изменение статического давления на поверхности сферического центрального тела. В точке входа газа в сопло давление равно камерному (отличия в пределах точности измерений), затем наблюдается разгон потока и торможение его в районе оси сопла.

С ростом величины x (открытием сопла) заметно увеличивается область высокого давления, занимая в пуске $x = 4$ мм поверхность угловым размером до 30° . В то же время сохраняется область сверхзвуковых скоростей, где давление падает в 7–20 раз (в эксперименте – ниже атмосферного). Учитывая, что область высокого давления находится на периферии центрального тела и составляющая сил давления направлена под углом 90° (или близким к нему) к оси сопла, вклад этой области в величину осевой составляющей усилия – минимален.

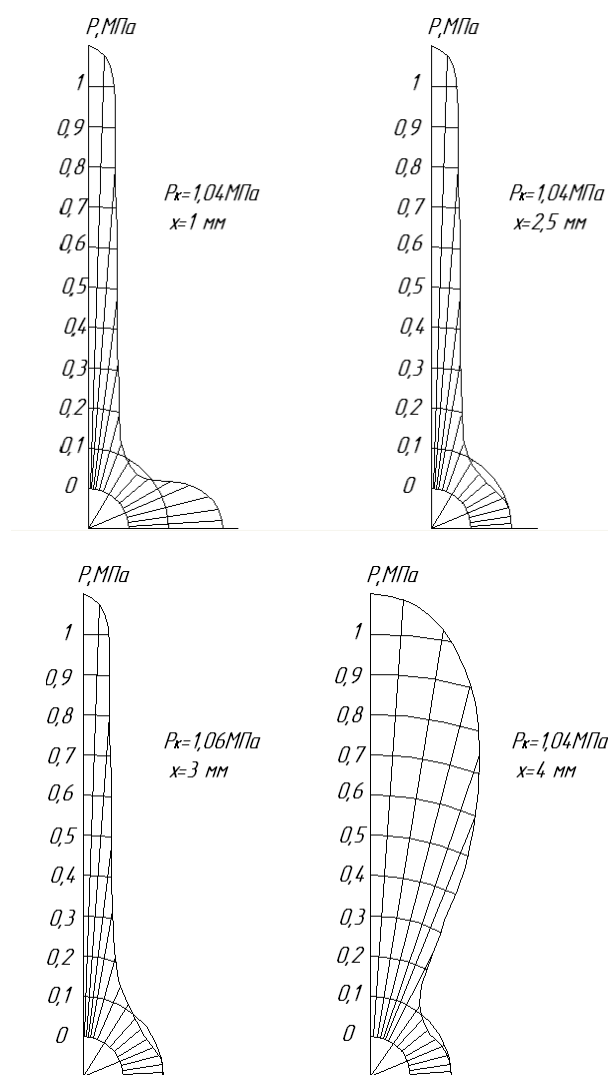


Рис. 15. Распределение статического давления на поверхности сферы

Как и было показано при проведении визуализированного эксперимента, наиболее четкая картина течения в соответствии с рис. 16 получается с использованием в роли центрального тела конуса.

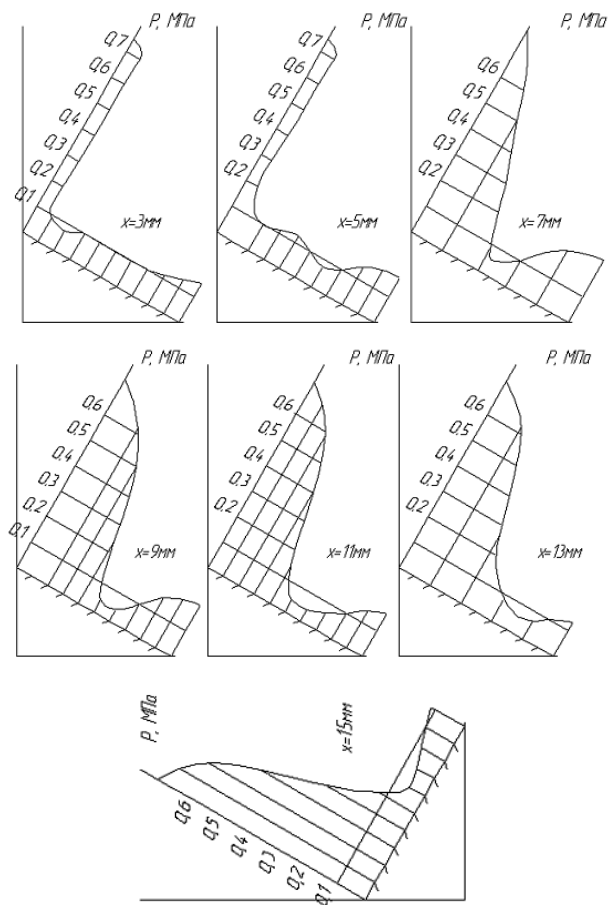


Рис. 16. Распределение статического давления по поверхности конуса

При малом открытии критического сечения, т. е. при малых x наблюдаются местные разгон и торможение потока, что можно связать с оптически неоднородными участками потока, т. е. до- и сверхзвуковыми зонами в поле течения. Это подтверждается перепадами статического давления на поверхности конуса, хорошо заметными при $x = 11$ мм; $p_k = 0,4$ МПа; $x = 5$ мм; $p_k = 0,75$ МПа.

Местное повышение давления есть результат взаимодействия скачков уплотнения с поверхностью конуса, сравнительно грубая сетка дренирования поверхности приемниками давления не позволяет конкретно выделить скачки уплотнения. Однако полученная картина распределения давления на поверхности конуса позволяет провести численное либо графическое интегрирование.

На рис. 17 представлены результаты экспериментальных исследований расходных характеристик исследуемых сопел. Переменными величинами являются: перемещение центрального тела вдоль оси – x или, что то же, степень открытия критического сечения сопла и давлени-

ние перед соплом p_k , которое менялось от 0,4 до 1,1 МПа.

Испытания проведены для тех же трех типов центральных тел – прямолинейного конуса, сферы и плоской тарели.

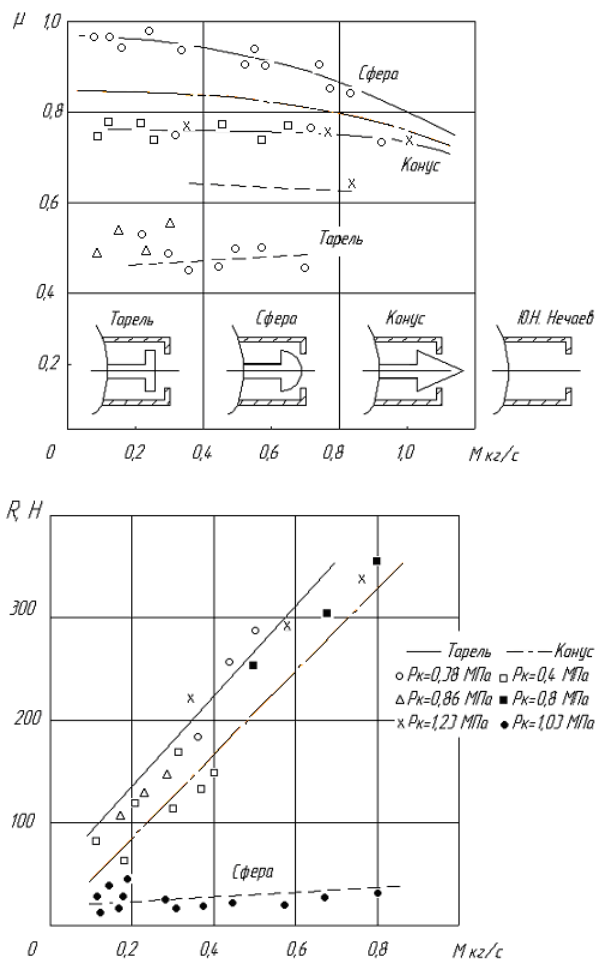


Рис. 17. Коэффициенты расхода исследованных сопел

Результаты эксперимента показывают, что для конического центрального тела коэффициент расхода изменяется от $0,5 \div 0,75$ при открытии критического сечения на 3 мм до $0,7 \div 0,75$ при увеличенном $x = 13 \div 15$ мм. Однако с ростом давления в камере p_k , т. е. с увеличением расхода газа коэффициент расхода имеет тенденцию к снижению. Этот факт входит в определенное противоречие с известными теоретическими положениями о постоянстве коэффициента расхода с ростом числа Re – работы клапана в области автомодельности. На наш взгляд, это может быть объяснено тем обстоятельством, что при наличии звукового перепада на клапане

расход определяется не собственно площадью критического сечения, а площадью, определяемой так называемой «звуковой» линией, которая может быть и криволинейной.

Коэффициент расхода для центрального тела (сферы) получается близким к единице, т. е. значения экспериментально измеренного и теоретического расхода газа здесь совпадают. Это вполне объяснимо, так как в этом случае реализуются почти идеальные условия формирования газового потока в критическом сечении сопла, канал плавно переходит от широкого сечения к узкому.

Для тарелочного клапана коэффициент расхода меняется от 0,5 до 0,7, что находится в согласии с ранее известными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулируемые твердотопливные двигательные установки: Методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования / В. Г. Зезин [и др.]. Миасс: ГРЦ «КБ им. академика В. П. Макеева», 1996. 295 с.

2. Целищев В. А., Русак А. М. Исследование системы автоматического регулирования РДТТ // Газоструйные импульсные системы: Ижевск, ИжГТУ, 2003. Т. 1. С. 59–80.

3. Целищев В. А., Смородинов А. П. Управляемый ракетный двигатель твердого топлива многократного включения // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5, № 2(10). С. 82–87.

ОБ АВТОРАХ



Бачурин Александр Борисович, магист. каф. прикл. гидромех. по спец. «Системы гидравлических и пневматических приводов».



Русак Анатолий Михайлович, проф. каф. прикл. гидромех. Д-р техн. наук. Иссл. в обл. систем управления ракетными двигателями твердого топлива.



Стрельников Евгений Владимирович, магист. каф. прикл. гидромех. по спец. «Системы гидравлических и пневматических приводов».



Целищев Владимир Александрович, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок.