

УДК 536.46

БИФУРКАЦИИ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЕМОГО СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА

С. А. Рашковский, Ю. М. Милехин*,
А. Н. Ключников*, А. В. Федорычев*

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва

* Федеральный центр двойных технологий "Союз", 140090 Дзержинский

E-mail: rash@ipmnet.ru

Проведено экспериментальное исследование расходной характеристики высотного регулируемого сопла в наземных условиях. Показано, что расходная характеристика регулируемого сопла может существенно зависеть от конструкции его сверхзвуковой части и условий эксплуатации. Установлено, что при работе такого сопла в зависимости от положения регулятора могут реализовываться различные режимы течения рабочего тела; при определенных условиях возможно скачкообразное изменение режима течения, которое приводит к скачкообразному изменению (бифуркации) расходной характеристики сопла.

Ключевые слова: регулируемое сопло, расходные характеристики, бифуркация, отрыв потока.

Введение. В ракетной технике нашли применение регулируемые энергетические установки на твердом топливе, в которых рабочее давление и тяга меняются в широком диапазоне за счет изменения площади критического сечения сопловых блоков [1, 2]. Одной из основных характеристик энергетических установок с регулируемыми сопловыми блоками является дроссельная характеристика — зависимость эффективной площади проходного сечения соплового блока от степени его открытия. От точности определения дроссельной характеристики непосредственно зависит точность прогнозирования внутрибаллистических параметров установки. Неточность при определении дроссельной характеристики регулируемого сопла может стать одной из причин потери устойчивости работы регулируемой двигательной установки в целом.

Несмотря на развитие вычислительных методов [3], основным методом определения дроссельных характеристик сопел с регулируемым критическим сечением остается экспериментальный.

Дроссельная характеристика регулируемых сопловых блоков определяется экспериментально методом продувок воздухом или горячим газом при различной степени открытия проходного сечения [1]. Продувки так называемых высотных сопел, предназначенных для работы в условиях вакуума, проводятся либо на дорогостоящих высотных стендах [4], либо на открытых стендах с укороченной сверхзвуковой частью сопла или даже при ее отсутствии. В последнем случае полагается, что коэффициент расхода сопла определяется главным образом течением в дозвуковой и транзвуковой областях и не зависит от течения

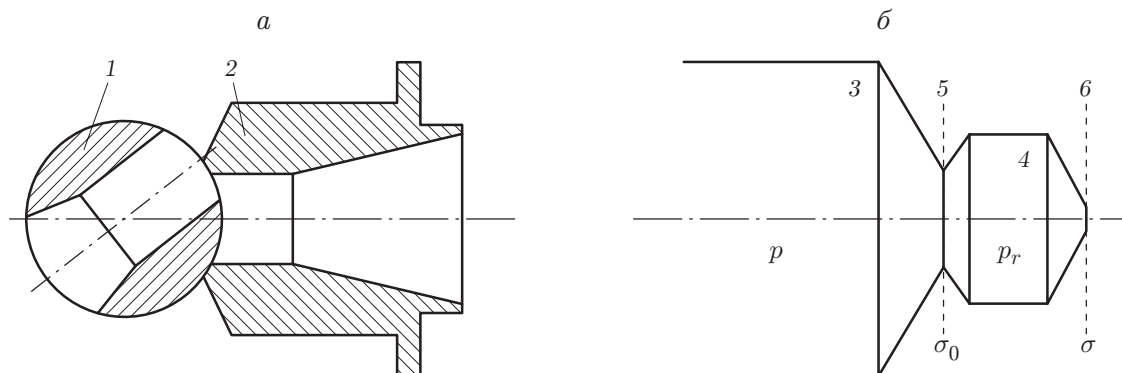


Рис. 1. Схема регулируемого сопла (*а*) и условная схема установки для определения дроссельной характеристики сопла (*б*):

1 — регулятор критического сечения сопла, 2 — вкладыш сопла, 3 — камера сгорания газогенератора, 4 — ресивер с регулируемым соплом, 5 — мерное сопло камеры сгорания, 6 — критическое сечение регулируемого сопла

в сверхзвуковой части сопла. Полученная в наземных условиях дроссельная характеристика используется для расчета параметров твердотопливной энергетической установки с полноразмерным соплом в условиях вакуума. Возникает вопрос о правомерности такого подхода, тем более что при проектировании регулируемых двигательных установок на твердом топливе приходится решать обратную задачу внутренней баллистики с целью определения истинного нестационарного закона горения твердого топлива в широком диапазоне значений давления [1, 2, 5, 6] и ошибки при вычислении коэффициента расхода переносятся на закон горения твердого топлива.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных определений в наземных условиях дроссельных характеристик регулируемых сопловых блоков с полноразмерными соплами и показано, что при определенных условиях коэффициент расхода полноразмерного сопла в отличие от укороченного может изменяться скачкообразно.

Методика эксперимента. На рис. 1, *а* приведена схема регулируемого соплового блока (далее — сопло), который состоит из вращающегося регулятора 1 и неподвижного вкладыша 2. Проходное сечение регулятора имеет в плане прямоугольную форму, как и входное сечение вкладыша сопла, которое плавно переходит в конический выходной раструб. Площадь критического сечения сопла меняется в результате поворота регулятора; угол поворота регулятора изменялся в диапазоне $\alpha = -28 \div +28^\circ$. Полностью закрытому критическому сечению соответствует значение $\alpha = -28^\circ$, полностью открытому соплу — значение $\alpha = 28^\circ$.

Для измерения расходных характеристик регулируемого сопла использовалась установка, состоящая из источника рабочего тела, мерного сопла с известной площадью проходного сечения σ_0 и установленного за ним ресивера с регулируемым соплом (рис. 1, *б*).

В качестве источника рабочего тела использовался газогенератор на твердом топливе. Температура продуктов сгорания топлива $T_B = 1800$ К, показатель адиабаты $k = 1,25$.

В процессе работы газогенератора с помощью механического привода менялось критическое сечение сопла, при этом непрерывно измерялись давление в камере сгорания p , давление в ресивере p_r и угол поворота регулятора критического сечения сопла α . Угол поворота регулятора менялся по заданному ступенчатому закону с короткими переходными участками. Кривые давления $p(\tau)$, $p_r(\tau)$ также имели ступенчатый вид с относительно длинными квазистационарными участками, что позволяло использовать их для расчета расходных характеристик сопла.

Параметры установки выбирались таким образом, чтобы перепад давления между камерой сгорания и ресивером был существенно дозвуковым.

В пренебрежении течением в камере сгорания газогенератора и гидравлическими потерями в мерном сопле давление, измеряемое в ресивере, представляет собой статическое давление потока на выходе из мерного сопла, а давление в камере сгорания — полное давление того же потока.

Для расчета критического сечения регулируемого сопла использовалось газодинамическое соотношение [7], которое в рассматриваемом случае принимает вид

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{p_r}{p}\right)^{1/k} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_r}{p}\right)^{(k-1)/k}\right]}. \quad (1)$$

Расчеты дроссельных характеристик проводились на квазистационарных участках диаграммы давления, для того чтобы исключить нестационарные газодинамические эффекты на переходных участках. Сопло регулировалось таким образом, чтобы в камере сгорания сохранялись заданные значения давления на квазистационарных участках: $p = 8, 13, 26, 50$ атм.

Результаты газодинамических расчетов $\sigma(\alpha)$ для различных значений $p(\tau)$ представлены на рис. 2, 3 в безразмерном виде. В качестве масштаба использовалась геометрическая площадь минимального сечения сопла при $\alpha = 0^\circ$. На рис. 2, 3 приведены также зависимости $\sigma(\alpha)$, рассчитанные по геометрической площади минимального сечения сопла при постоянном коэффициенте расхода $\mu = 0,88$.

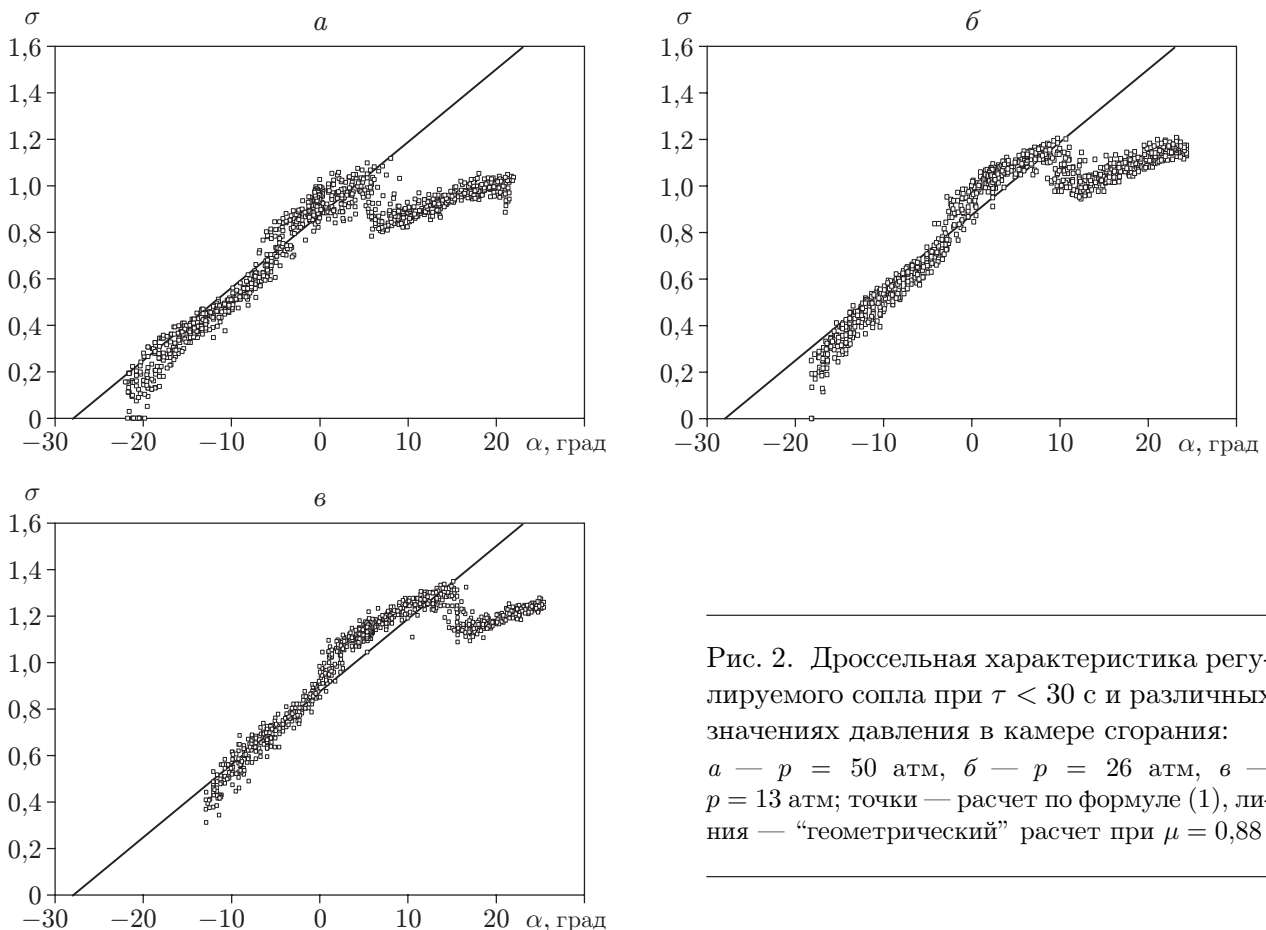


Рис. 2. Дроссельная характеристика регулируемого сопла при $\tau < 30$ с и различных значениях давления в камере сгорания: a — $p = 50$ атм, b — $p = 26$ атм, v — $p = 13$ атм; точки — расчет по формуле (1), линия — “геометрический” расчет при $\mu = 0,88$

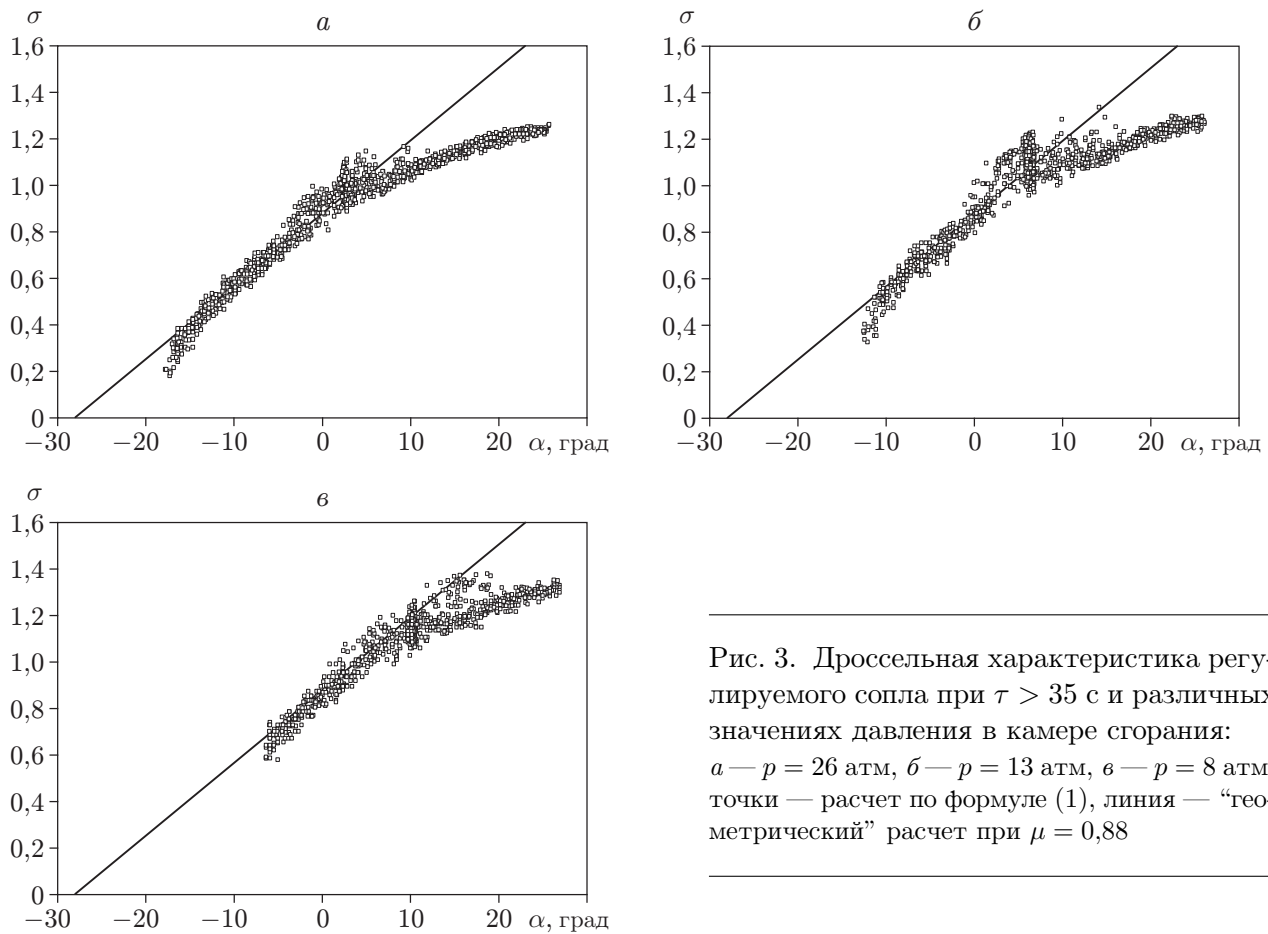


Рис. 3. Дроссельная характеристика регулируемого сопла при $\tau > 35$ с и различных значениях давления в камере сгорания:
a — $p = 26$ атм, *б* — $p = 13$ атм, *в* — $p = 8$ атм;
 точки — расчет по формуле (1), линия — “геометрический” расчет при $\mu = 0,88$

Обсуждение результатов. Анализ рис. 2, 3 позволяет сделать следующие выводы.

1. В общем случае дроссельная характеристика исследуемого сопла имеет три участка с различными зависимостями $\sigma(\alpha)$ (рис. 4). На участке I рассчитанная по газодинамическому соотношению (1) дроссельная характеристика практически совпадает с дроссельной характеристикой, полученной по “геометрической” модели, и соответственно с дроссельной характеристикой, полученной при продувках воздухом. При достижении углом поворота регулятора значения α_1 происходит скачкообразное изменение дроссельной характеристики (бифуркация), при этом площадь критического сечения резко увеличивается (приблизительно на 10–20 %). Следует отметить, что при этом коэффициент расхода сопла достигает значения $\mu \approx 1$. Это означает, что в результате бифуркации происходит самопроизвольное выравнивание потока в его минимальном сечении.

На участке II ($\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$) зависимость $\sigma(\alpha)$ остается практически линейной, однако производная $d\sigma/d\alpha$ оказывается меньше, чем на участке I. Такая зависимость $\sigma(\alpha)$ сохраняется вплоть до величины угла $\alpha = \alpha_2$, при которой происходит вторая бифуркация, при этом площадь критического сечения резко уменьшается (на 15–20 %), а зависимость $\sigma(\alpha)$ вновь меняется: остается практически линейной, но с другим значением производной $d\sigma/d\alpha$, не совпадающим с ее значениями на участках I, II.

2. Можно выделить два характерных временных интервала работы установки, различающихся зависимостями $\sigma(\alpha)$: $\tau = 0 \div 30$ с (см. рис. 2) и $\tau > 35$ с (см. рис. 3). На рис. 2, 3 видно, что при $\tau \approx 35$ с (см. рис. 3) дроссельные характеристики регулятора практически не зависят от давления, в то время как при $\tau < 30$ с (см. рис. 2) они значительно раз-

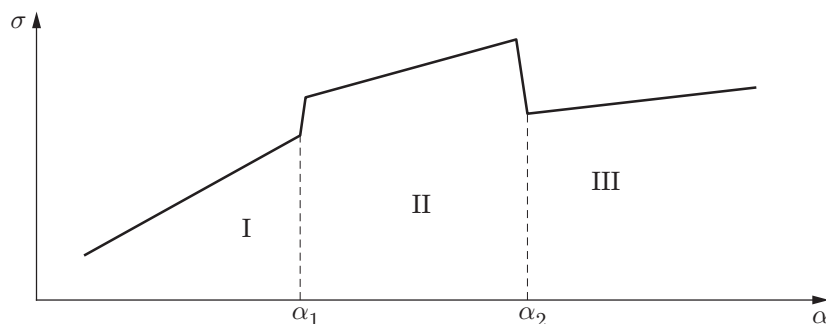


Рис. 4. Обобщенная дроссельная характеристика регулируемого сопла:
 I — $-28^\circ \leq \alpha < \alpha_1$, II — $\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$, III — $\alpha_2 \leq \alpha < 28^\circ$

личаются для разных значений давления, причем это различие наиболее существенно на участке III ($\alpha_2 \leq \alpha < 28^\circ$), менее выражено на участке II ($\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$) и практически отсутствует на участке I ($-28^\circ \leq \alpha < \alpha_1$).

3. Величины углов α_1 и α_2 , при которых происходит смена режимов (бифуркация), зависят от давления и практически не зависят от времени.

4. Вблизи пороговых величин углов α_1 , α_2 наблюдаются значительные разбросы значений $\sigma(\alpha)$, в некоторой степени сохраняющиеся и на участке II зависимости $\sigma(\alpha)$ ($\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$). На участках I, II разброс значений функции $\sigma(\alpha)$ значительно меньше.

Рассмотрим причины аномального на первый взгляд поведения дроссельной характеристики регулируемого сопла. Форма дроссельной характеристики обусловлена особенностями течения газа в сопле. Схемы течения продуктов сгорания в сопле при различных углах поворота регулятора показаны на рис. 5. Газовый тракт, образованный каналом регулятора и каналом вкладыша сопла, имеет уступ, высота которого зависит от угла поворота регулятора. При переходе из канала регулятора в канал вкладыша поток отрывается от угловой точки и за уступом образуется застойная зона. Скорость течения газа в застойной зоне существенно меньше скорости потока на выходе из регулятора (которая примерно равна скорости звука), поэтому перепад давления в застойной зоне существенно меньше перепада давления во внешнем потоке и давление в застойной зоне (донное давление) можно считать практически постоянным [8].

Критическое сечение сопла проходит через угловую точку, поэтому вблизи нее скорость газа равна скорости звука, а давление равно критическому давлению.

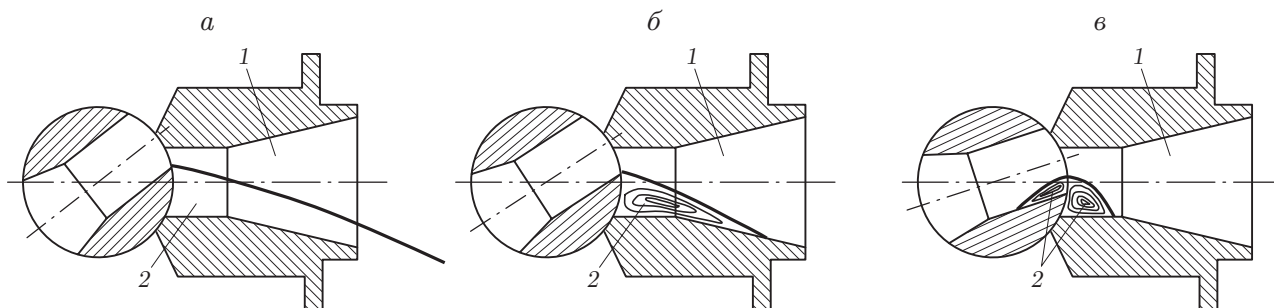


Рис. 5. Схемы течения продуктов сгорания в регулируемом сопле при различных положениях регулятора:
 а — $\alpha < \alpha_1$, б — $\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$, в — $\alpha > \alpha_2$; сплошная линия — границная линия тока;
 1 — область течения, 2 — застойная зона

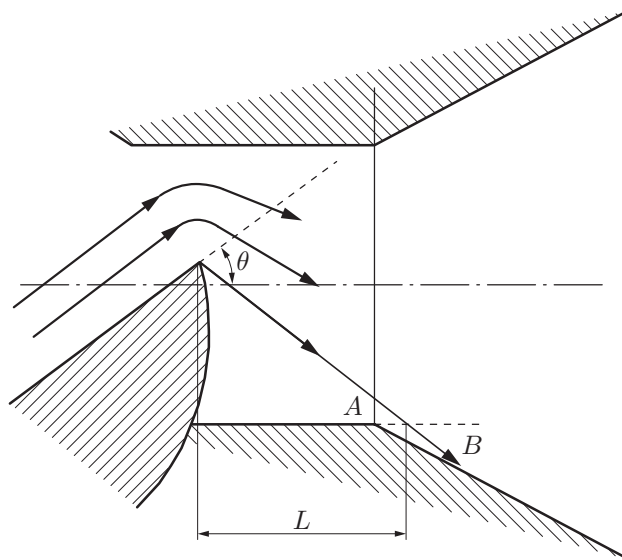


Рис. 6. Схема течения вблизи угловой точки регулятора

При отрыве от угловой точки на выходе из канала регулятора поток расширяется, при этом давление меняется от критического до донного. Это расширение происходит в виде волн разрежения. В результате вблизи угловой точки реализуется течение Прандтля — Майера и поток разворачивается на угол θ (рис. 6), который определяется соотношением [7]

$$\theta = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \sqrt{M^2-1} \right) - \operatorname{arctg} \sqrt{M^2-1}, \quad (2)$$

где k — показатель адиабаты продуктов сгорания; M — число Маха на поверхности оторвавшейся струи, связанное с донным давлением p_d в застойной зоне изоэнтропическим соотношением

$$\frac{p_d}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-k/(k-1)}. \quad (3)$$

При малых углах поворота регулятора $\alpha < \alpha_1$ (см. рис. 5, а) образуется свободная струя, не замыкающаяся на стенке сопла, при этом застойная зона оказывается открытой и сообщается с окружающей средой. В результате донное давление примерно равно давлению окружающей среды $p_d \approx p_H$ (при наземных испытаниях $p_H = 1$ атм).

С увеличением угла поворота регулятора свободная поверхность струи приближается к стенке сопла, и при некотором значении угла $\alpha = \alpha_1$ струя касается стенки; вследствие эжектирующего действия струи давление в застойной зоне уменьшается и струя прилипает к стенке сопла. В результате образуется замкнутая каверна, не сообщаемая с окружающей средой. Донное давление в такой каверне будет либо меньше, либо приблизительно равно давлению p_H (так как угол натекания струи на коническую поверхность сопла мал и струя направлена практически по касательной к стенке сопла). При прилипании струи к стенке сопла происходит перестройка потока, в первую очередь вблизи точки отрыва. Вследствие этого меняется форма звуковой линии. Поскольку при прилипании потока граница струи отклоняется вниз (см. рис. 5, б), поток расширяется, и площадь критического сечения сопла увеличивается. Это проявляется в виде резкого увеличения площади критического сечения при достижении определенного значения $\alpha = \alpha_1$.

При дальнейшем увеличении угла поворота регулятора ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$) угол наклона свободной поверхности струи к оси сопла увеличивается, и точка B присоединения по-

тока к стенке сопла перемещается в направлении критического сечения — к регулятору (на рис. 5, 6 — влево). При некотором значении угла поворота регулятора $\alpha = \alpha_2$ точка B присоединения потока перемещается в угловую точку A (см. рис. 6), при этом угол натекания потока на стенку меняется скачкообразно. Поскольку донное давление существенно зависит от угла натекания [8], при $\alpha = \alpha_2$ оно резко изменяется, кроме того, происходит перестройка течения как в застойной зоне, так и вблизи критического сечения. При больших углах натекания потока на стенку отношение донного давления к давлению в набегающем потоке остается практически постоянным: $p_d/p_* \approx 0,7$ [8], где $p_* = p(2/(k+1))^{k/(k-1)} \approx 0,5p$ — критическое давление потока.

Таким образом, при переходе через значение угла $\alpha = \alpha_2$ донное давление резко увеличивается, вследствие чего отрыв потока начинается уже в регуляторе (см. рис. 5); образующаяся при этом застойная зона частично перекрывает проходное сечение регулятора, что приводит к резкому уменьшению его критического сечения.

На участке $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ угол наклона кривой зависимости $\sigma(\alpha)$ отличается от угла наклона данной кривой на участке I вследствие перестройки застойной зоны при изменении ее длины. На участке $\alpha > \alpha_2$ угол наклона кривой зависимости $\sigma(\alpha)$ также будет другим вследствие перестройки формы застойной зоны при перемещении точки присоединения потока в направлении регулятора.

Таким образом, α_1 — угол, при котором течение Прандтля — Майера замыкается на стенке сопла (в наиболее удаленной точке — в выходном сечении сопла), а угол α_2 — это угол, при котором точка B присоединения струи перемещается в угловую точку A (см. рис. 6), где прямоугольное сечение сопла переходит в коническое.

Для того чтобы охарактеризовать положение свободной поверхности струи относительно стенки сопла, введем расстояние L (см. рис. 6), которое связано с углом α соотношением

$$\operatorname{tg}(\theta + \alpha - 2\delta) = \frac{H}{2L} - \frac{R}{L} \sin \alpha. \quad (4)$$

При заданном L уравнение (4) определяет соответствующий угол α .

Результаты анализа формы сопла показывают, что при некотором $L = L_1$ свободная струя замыкается на стенке сопла и при некотором $L = L_2$ перемещается в угловую точку A (см. рис. 6). Подставляя в уравнение (4) каждое из этих значений, определим величины углов α_1, α_2 . Зависимости $\alpha_1(p), \alpha_2(p)$, полученные при решении уравнений (2)–(4) при значениях L_1 и L_2 для исследуемого сопла, показаны линиями на рис. 7. Также на рис. 7 приведены экспериментальные значения α_1, α_2 , полученные при различных значениях давления и соответствующие данным, представленным на рис. 2, 3. В расчете делалось допущение, что и на участке II ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$) давление в застойной зоне близко к давлению окружающей среды: $p_d \approx p_H$ (это обусловлено малостью угла натекания струи на коническую стенку сопла).

На рис. 7 видно, что расчетные зависимости $\alpha_1(p), \alpha_2(p)$ хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это подтверждает описанный механизм изменения дроссельной характеристики регулятора.

Из рис. 3, 6 следует, что на начальном этапе работы установки ($\tau < 30$ с) дроссельные характеристики на участке II ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$) и участке III ($\alpha > \alpha_2$) зависимости $\sigma(\alpha)$ меняются с течением времени, при $\tau > 35$ с дроссельные характеристики практически не зависят от давления в камере сгорания и остаются неизменными на любом участке циклограммы функционирования (см. рис. 3). Такое поведение дроссельных характеристик можно объяснить тепловыми потерями на начальном этапе работы установки.

В замкнутых застойных зонах (участки II, III на рис. 4) газ находится в течение длительного времени и успевает отдать тепло относительно холодной стенке сопла; в резуль-

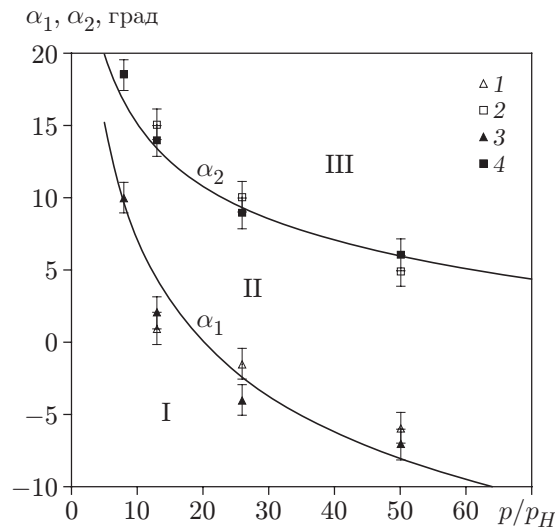


Рис. 7. Течение в регулируемом сопле:

точки — данные эксперимента (1, 2 — первая половина времени работы установки ($\tau < 30$ с), 3, 4 — вторая половина времени работы установки ($\tau > 30$ с)); линии — расчет по теоретическим зависимостям (2)–(4); I–III — области, соответствующие участкам, показанным на рис. 4

тате в замкнутой застойной зоне температура газа практически равномерно распределена по объему и меняется вместе с температурой стенки в ходе ее прогрева. Поскольку донное давление зависит от температуры газа в застойной зоне [8] и также меняется при прогреве стенок сопла, форма застойной зоны (форма граничной линии тока (см. рис. 5)) меняется, следовательно, течение в критическом сечении перестраивается и коэффициент расхода меняется даже при неизменном положении регулятора (т. е. при фиксированном угле α). Приблизительно через 35 с с момента начала работы установки устанавливается стационарное тепловое состояние стенок сопла, и температура газа в замкнутых застойных зонах стабилизируется; наряду с ней стабилизируются форма застойной зоны и дроссельные характеристики регулятора (см. рис. 3). Вследствие этого при $\tau > 35$ с дроссельные характеристики практически не меняются с течением времени и одинаковы для всех значений давления в камере сгорания. Это справедливо только для замкнутых застойных зон. В открытых застойных зонах время нахождения газа порядка 10^{-5} с и тепловое состояние стенок сопла слабо влияет на течение газа в струе, поэтому в течение всего времени работы установки дроссельные характеристики на участке I ($\alpha < \alpha_1$) практически не меняются и не зависят от давления в камере сгорания.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дроссельная характеристика регулируемого сопла существенно зависит от условий, в которых работает или испытывается сопло.

Как следует из соотношений (2), (3), с ростом донного давления угол отклонения потока θ (см. рис. 6) уменьшается. Если внешнее давление p_H оказывается большим ($p_H \gg 1$ кгс/см²), угол θ будет относительно малым и поток может не замкнуться на стенке сопла; в этом случае застойная зона будет оставаться всегда открытой, а открытой застойной зоне, как сказано выше, соответствует постоянное значение коэффициента расхода μ при любых углах α (см. рис. 2, 3).

В случае если продукты сгорания вытекают из сопла не в окружающую среду, а в некий объем, в котором давление выше атмосферного, возникающая за регулятором за-

стойная зона всегда будет открытой, сопло будет работать в режиме, соответствующем участку I (см. рис. 4), и, следовательно, иметь практически постоянный коэффициент расхода. Как показано выше, в этом случае дроссельная характеристика достаточно точно определяется “геометрическим” расчетом с постоянным коэффициентом расхода (линии на рис. 2, 3). Существованию открытой застойной зоны в широком диапазоне углов регулирования α способствует также использование обрезанного сопла, а особенно использование только вкладыша без расширяющейся части. Данный вывод подтверждают результаты многочисленных продувок воздухом того же сопла с вкладышем без конического раструба. При продувках воздухом зависимость $\sigma(\alpha)$ совпадает с “геометрической” зависимостью, рассчитанной по минимальному сечению сопла с постоянным коэффициентом расхода $\mu = 0,88$ (линии на рис. 2, 3).

Определим дроссельную характеристику сопла с вкладышем без конического раструба в высотных условиях (т. е. при $p_H \approx 0$). В этом случае число Маха в свободной струе равно $M = \infty$, угол отклонения потока находится по формуле

$$\theta = \theta_{\max} = \frac{\pi}{2} \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right).$$

В рассматриваемом случае $\theta_{\max} \approx 170^\circ$. Очевидно, что при высотных испытаниях открытая застойная зона существовать не может, поэтому участок I дроссельной характеристики в условиях вакуума отсутствует, и начиная с угла $\alpha = -28^\circ$ сразу реализуется участок II или участок III зависимости $\sigma(\alpha)$ (см. рис. 4). При этом дроссельная характеристика является существенно нелинейной: при больших углах α реализуется участок III зависимости $\sigma(\alpha)$ (см. рис. 4), а при $\alpha = -28^\circ$ $\sigma \approx 0$.

Таким образом, дроссельная характеристика регулируемого сопла в существенной степени зависит от условий испытания и эксплуатации. В частности, дроссельная характеристика, полученная при наземных испытаниях, может значительно отличаться от дроссельной характеристики того же сопла в высотных условиях.

Заключение. Дроссельная характеристика регулируемого сопла может существенно зависеть от конструкции его сверхзвуковой части. В зависимости от положения регулятора при работе такого сопла могут реализовываться различные режимы течения рабочего тела. При определенных условиях возможно скачкообразное изменение режима течения рабочего тела, которое приводит к скачкообразному изменению (бифуркации) дроссельной характеристики сопла.

Таким образом, при проектировании и испытаниях регулируемых энергетических установок на твердом топливе необходимо учитывать возможную перестройку течения при регулировании сопла и обусловленные этим изменения его расходных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соломонов Ю. С.** Твердотопливные регулируемые двигательные установки / Ю. С. Соломонов, А. М. Липанов, А. В. Алиев, А. А. Дорофеев, В. И. Черепов. М.: Машиностроение, 2011.
2. **Иванов С. М., Цуканов Н. А.** Регулирование давления в полузакнутом объеме при горении твердых топлив с показателем степени в законе горения больше единицы // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 45–56.
3. **Пирумов У. Г.** Газовая динамика сопел / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. М.: Наука, 1990.
4. **Шишков А. А.** Высотные испытания реактивных двигателей / А. А. Шишков, Б. М. Силин. М.: Машиностроение, 1985.

5. **Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г.** Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. 1. Методы исследования // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 5. С. 82–87.
6. **Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г.** Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. 2. Результаты исследования // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 5. С. 88–96.
7. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.
8. **Чжен П.** Отрывные течения. М.: Мир, 1973. Т. 3.

*Поступила в редакцию 16/І 2013 г.,
в окончательном варианте — 13/ІІІ 2013 г.*
