

УДК 533.6.071.1

© 1990 г.

О. А. ВАСИЛЬЕВ, С. Н. МИНИН, А. В. ШИПОВСКИХ

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В СОПЛАХ С УЧАСТКОМ ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ В ОБЛАСТИ МИНИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования структуры течения в плоских соплах с участком постоянной высоты в области минимального сечения. Изучено влияние продольных и поперечных отклонений сопловых лопаток на параметры транс- и сверхзвукового течения.

Широкое распространение в сверхзвуковых лазерах получили решетки сопел, набирающиеся из отдельных плоских сопловых лопаток. Как правило, эти сопла имеют участок постоянной высоты в области минимального сечения.

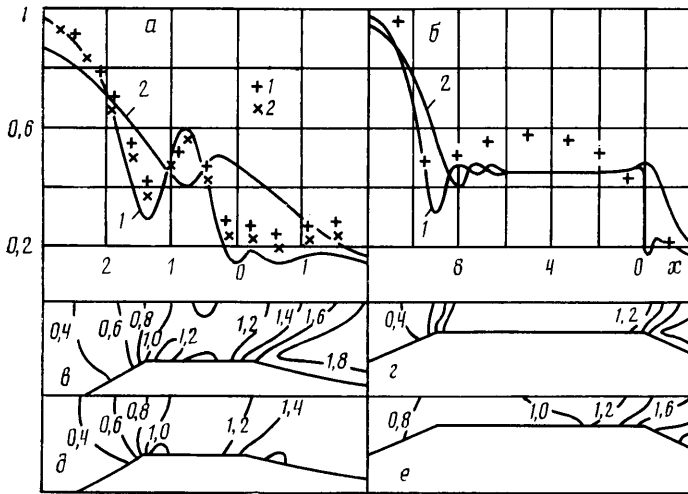
Заметное влияние участка постоянной высоты на параметры течения в сверхзвуковой области сопла обнаружено в работах [1, 2], исследования [3, 4] выявили сложную структуру течения в трансзвуковой области таких сопел.

Расчетные исследования проводились для стационарного двухмерного до- и трансзвукового течения идеального газа в плоских соплах. Решение нестационарной системы уравнений газовой динамики осуществлялось методом установления, разработанным и подробно изложенным в [5].

В экспериментальных исследованиях использовалось плоское сопло, составленное из двух профилированных дуралюминиевых пластин шириной 150 мм. В качестве рабочего газа использовался воздух или азот, которые подавались из газобаллонной рампы. Выхлоп производился в вакуумную емкость, откачанную до давления  $\approx 2,5 \cdot 10^3$  Па. Геометрические размеры сопла: полуугол сужения дозвуковой части  $\alpha = 30^\circ$ , длина участка постоянной высоты  $l = 9$  мм, длина сверхзвукового профилированного участка  $l_c = 30$  мм, номинальная высота минимального сечения  $h_{*H} = 10$  мм, номинальная степень расширения  $S_H = h/h_{*H} = 2$ , где  $h$  — высота выходного сечения.

В экспериментах измерялись полное давление газа на входе в сопло  $P_0$ , распределение статического давления  $P$  на профилированных и боковых стенках сопла в трансзвуковой области. С помощью насадков полного и статического давления определялись все газодинамические параметры течения на расстоянии 30 мм от среза сопла. Распределение чисел Маха в трансзвуковой области сопла вычислялось по соответствующему распределению статического давления с помощью изоэнтропических зависимостей.

Рассмотрим влияние изменения длины участка постоянной высоты в области минимального сечения и числа Рейнольдса на характер трансзвукового течения. На фиг. 1 представлены расчетно-экспериментальные данные для сопел с различной длиной участка постоянной высоты:  $l_n = 2l/h_* = 1,38$  (а, в, д),  $l_n = 9,0$  (б, г, е). Распределения статического давления  $\pi = P/P_0$  (сплошные кривые) на профилированной стенке сопла (1) на оси симметрии (2) получены из расчета. Точками 1, 2 показаны экспериментальные данные, полученные при разных числах Рейнольдса  $Re_{h_*}$ , определенных по параметрам газового потока в минимальном сечении: 1 —  $Re_{h_*} = 3,4 \cdot 10^4$ , 2 —  $Re_{h_*} = 6 \cdot 10^4$ . По оси абсцисс отложена безразмерная координата  $x = 2,0 \cdot X/h_*$ .



Фиг. 1

На фиг. 1, *а, б* показаны расчетные, а на фиг. 1, *д, е* — экспериментально измеренные поля чисел Маха в трансзвуковой области. Видно, что для сопла с  $l_n=1,38$  криволинейная звуковая линия образуется у передней угловой точки. При обтекании угловой точки газовый поток разгоняется до числа Маха  $M>1$  и затем тормозится в волнах сжатия. При обтекании задней угловой точки поток также испытывает перерасширение с последующим образованием зоны торможения в окрестности угловой точки.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными указывает на заметное влияние вязких эффектов на характеристики течения. В эксперименте отмечено меньшее перерасширение потока у передней угловой точки, так как пограничный слой формирует более плавный контур сопла для невязкого течения ядра потока. При увеличении числа Рейнольдса увеличивается и интенсивность перерасширения потока, но расчетные значения при данных параметрах эксперимента не достигаются. Аналогичная картина наблюдается и при обтекании задней угловой точки.

Результаты экспериментов показывают, что изменение длины участка постоянной высоты  $l_n$  в диапазоне  $1,38 \leq l_n \leq 3$  не вызывает существенного изменения в характере трансзвукового течения. Следует отметить лишь то, что в данном диапазоне длин  $l_n$  звуковая линия как в расчете, так и в эксперименте образуется у передней угловой точки. Экспериментально зафиксированная интенсивность перерасширения потока за угловыми точками меньше расчетной. В целом экспериментально измеренные параметры течения в области участка постоянной высоты более плавные, чем полученные в расчетах, из-за демпфирования падающих волн сжатия пограничным слоем. Имеющиеся количественные различия между результатами расчета и эксперимента незначительны. Оба метода исследования дают совпадающие качественные результаты: звуковая линия формируется в области передних угловых точек, течение газа в канале постоянного сечения сверхзвуковое.

Дальнейшее увеличение длины участка постоянной высоты (фиг. 1, *б, г, е*,  $l_n=9$ ) приводит к более заметным качественным и количественным различиям между результатами расчетов и эксперимента. Так, по расчету, у передней угловой точки газовый поток разгоняется до числа  $M>1$  и в области участка постоянной высоты движется с примерно постоянной сверхзвуковой скоростью. В действительности же (при  $Re_{*} = 3,4 \cdot 10^4$ ) в зависимости от длины участка постоянной высоты в присте-

ночной области у передней угловой точки газовый поток либо достигает, либо не достигает (как в случае  $l_n=9$ ) сверхзвуковой скорости, оставаясь на оси сопла дозвуковым. За передней угловой точкой наблюдается плавное торможение потока. Образование звуковой линии происходит в области задней угловой точки. Таким образом, можно отметить, что увеличение длины участка постоянной высоты вызывает все более существенное расхождение результатов эксперимента с расчетными данными.

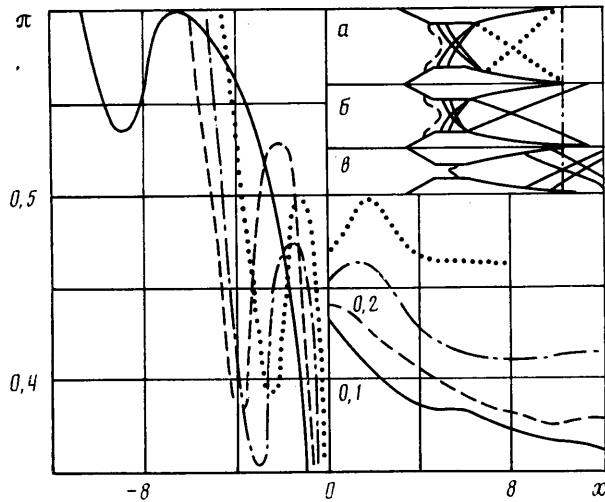
Эволюция характера течения в трансзвуковой области при увеличении длины участка постоянной высоты  $l_n$  наиболее наглядно представлена на фиг. 2. Здесь показаны экспериментально измеренные распределения статического давления  $\pi$  на профилированной стенке сопла для различных длин  $l_n$  при числе Рейнольдса  $Re_{h^*}=3,4 \cdot 10^4$  (сплошная кривая соответствует  $l_n=9$ , штриховая — 4,5, штрихпунктирная — 2,25, пунктирная — 1,38). Видно, что при увеличении  $l_n$  от 1,38 до 2,25 увеличивается интенсивность перерасширения потока за передней угловой точкой. Связано это с методикой проведения эксперимента, поскольку увеличение длины  $l_n=2l/h^*$  достигалось уменьшением высоты минимального сечения  $h^*$ , причем для обеспечения постоянства числа Рейнольдса повышалось давление газа на входе в сопло, что приводило к уменьшению толщины пограничного слоя, нарастающего в дозвуковой области. Таким образом уменьшалась степень сглаживания пограничным слоем передней угловой точки, а это в свою очередь вызывало более интенсивное перерасширение потока.

Однако при достижении значения  $l_n=2,25$  и дальнейшем увеличении длины участка постоянной высоты интенсивность перерасширения снижается. Причиной этого является качественное перестроение течения, обусловленное значительным заполнением пограничным слоем канала постоянного сечения.

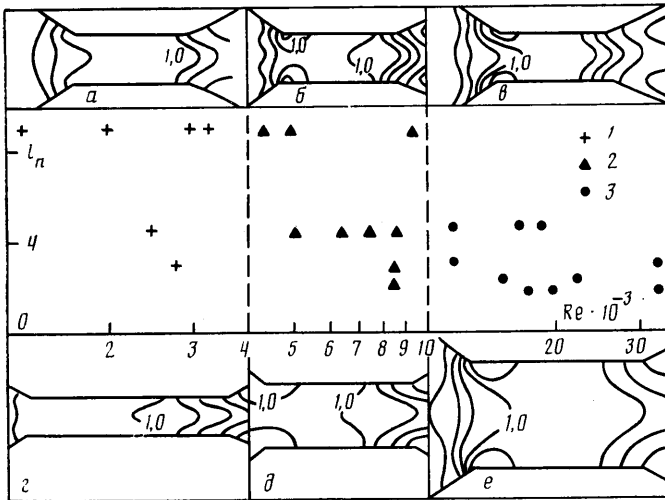
После прохождения угловой точки поток в пристеночной области тормозится в волнах сжатия с примерно одинаковым темпом для всех представленных случаев и при больших величинах  $l_n \geq 4,5$  переходит в дозвуковой. Повторный разгон потока происходит в области задней угловой точки и при этом наступает несколько раньше, еще в канале постоянного сечения. Это обстоятельство также связано с наличием пограничного слоя. Отрицательный градиент давления, возникающий за задней угловой точкой в сверхзвуковой области сопла, передается по пограничному слою в канал постоянного сечения. Это вызывает уменьшение толщины пограничного слоя и соответствующий разгон сверхзвукового потока. Этим же явлением объясняется и образование звуковой линии в случае  $l_n=9$  (фиг. 1, б, г, е) не на задней угловой точке, а в канале постоянного сечения (здесь образуется эффективное минимальное сечение сопла). Аналогичное влияние сверхзвуковой области течения на трансзвуковую отмечалось в работе [6].

Как показали проведенные экспериментальные исследования, уменьшение числа  $Re_{h^*}$  при заданной длине  $l_n$  также приводит к тому, что звуковая линия образуется в окрестности задней угловой точки. Следовательно, параметрами, определяющими характер трансзвукового течения в соплах подобной геометрии, являются величины  $Re_{h^*}$  и  $l_n$ .

Рассматривая экспериментально определенные картины трансзвукового течения в плоских соплах подобной геометрии, при различных величинах параметров  $Re_{h^*}$  и  $l_n$  можно выделить три типа этого течения: 1) с образованием звуковой линии в области передних угловых точек; 2) с образованием звуковой линии в области задних угловых точек и с локальными сверхзвуковыми зонами у передних угловых точек; 3) с образованием звуковой линии в области задних угловых точек и полностью дозвуковым течением в канале постоянного сечения. Переход от первого типа течения к третьему осуществляется как при уменьшении  $Re_{h^*}$ , так и при увеличении  $l_n$ , или при уменьшении параметра  $Re_{h^*}/l_n$ .



Фиг. 2



Фиг. 3

На основании многочисленных экспериментальных данных определены значения параметра  $Re^{\circ} = Re_{н*} / l_n$  для каждого из этих трех типов течения, представленные на фиг. 3. Здесь по оси абсцисс отложены значения параметра  $Re^{\circ} \cdot 10^{-3}$ , по оси ординат — длина участка постоянной высоты. Точки 1 соответствуют течению с образованием звуковой линии в области передних угловых точек, точки 2 — течению с образованием звуковой линии в области задних угловых точек и с локальными сверхзвуковыми зонами у передних угловых точек, точки 3 — течению с образованием звуковой линии в области задних угловых точек и без локальных сверхзвуковых зон в канале постоянного сечения.

В верхней части фиг. 3 представлены экспериментально определенные поля чисел Маха (с шагом 0,2) в различных типах течения, возникающих при изменении величины  $Re_{н*}$  для сопла с фиксированным значением  $l_n = 4,5$  (а —  $Re_{н*} = 10^4$ , б —  $4 \cdot 10^4$ , в —  $7,7 \cdot 10^4$ ). В нижней части фиг. 3 также показаны экспериментально определенные поля чисел Маха в различных типах течения, возникающих при изменении величины  $l_n$  и фиксированном значении  $Re_{н*} = 3,4 \cdot 10^4$  (г —  $l_n = 9$ , д — 4,5, е — 3). Видно, что величина параметра  $Re_{н*} / l_n$  определяет характер течения в трансзву-

ковой области сопла при любых значениях  $l_n$  и  $Re_{h_n}$ . Так, переход звуковой линии с передней угловой точки на заднюю происходит при  $Re_{h_n}/l_n \leq 10^4$ , а исчезновение локальных сверхзвуковых зон в области передней угловой точки — при  $Re_{h_n}/l_n \leq 4 \cdot 10^3$ . К такому изменению характера течения может привести как изменение числа  $Re_{h_n}$ , так и изменение длины участка постоянной высоты  $l_n$ .

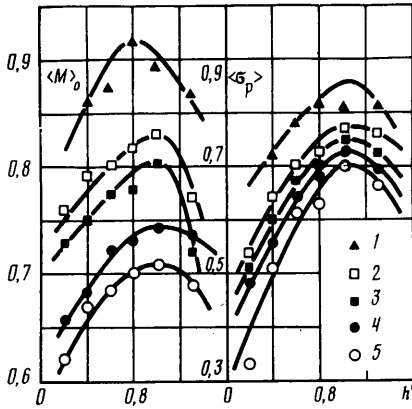
Рассмотрим изменение интегральных характеристик и характера течения в сверхзвуковой области сопла при поперечном сдвиге сопловых лопаток. На фиг. 2 также представлены экспериментально измеренные зависимости статического давления  $p$  на профилированной стенке в сверхзвуковой области для сопел с различными отклонениями высоты минимального сечения  $h$  от номинального значения  $h_n$ . Следует учитывать, что при наличии таких отклонений отличается от номинальной и степень расширения сопла. В правом верхнем углу схематично представлены картины течения в сверхзвуковой области для сопел с различными значениями  $h' = h/h_n$ :  $a - h' = 1,3$ ,  $b - 1,0$ ,  $c - 0,4$ . Штриховыми линиями показаны звуковые линии, сплошными — волны сжатия, пунктирными — скачки уплотнения, штрихпунктиром — выходное сечение сопла. Сечение  $X=0$  соответствует сечению, проходящему через задние угловые точки сопла.

Из фиг. 2 видно, что при  $h' > 1$  растут размер и интенсивность зоны торможения за задней угловой точкой. Волны сжатия здесь формируются в скачок уплотнения, который достигает противоположной стенки в области среза сопла (фиг. 2,  $a$ ). Увеличение отклонения размера минимального сечения в диапазоне  $h' < 1$  приводит к исчезновению зон торможения за задней угловой точкой.

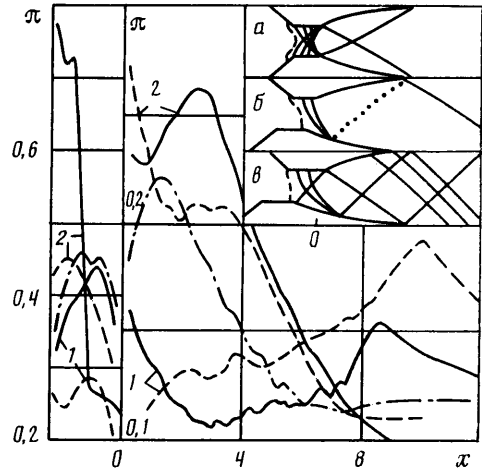
Объясняется это тем, что угол расширения сверхзвуковой части сопла  $\beta$  уже не обеспечивает разгона потока, необходимого для данной степени расширения  $S=3,5$  (фиг. 2,  $c$ ). Поэтому за угловой точкой по контуру сверхзвуковой части сопла образуются дополнительные волны разрежения, разгоняющие поток. Однако несоответствие профиля сверхзвуковой части сопла эффективной степени расширения вызывает образование волн сжатия у среза сопла. Причем в данном случае (при отклонениях  $h' < 1$ ) чем больше величина минимального сечения  $h$ , отличается от номинального значения  $h_n$ , тем ближе к минимальному сечению происходит образование волн сжатия. В случае  $h' = 1,0$  (фиг. 2,  $b$ ) за задней угловой точкой формируется слабая зона торможения. Связано это с имеющейся неравномерностью параметров газового потока на входе в сверхзвуковую часть сопла.

Зависимости интегральных характеристик течения — среднего относительного числа Маха  $\langle M \rangle_0$  (отношение среднего числа Маха потока к числу  $M$ , определенному по степени расширения сопла) и среднего коэффициента сохранения полного давления  $\langle \sigma_p \rangle$  — от величины отклонения размера минимального сечения сопла при разных числах Рейнольдса представлены на фиг. 4 ( $1 - Re_{h_n} = 10^3$ ,  $2 - 4 \cdot 10^4$ ,  $3 - 3 \cdot 10^4$ ). Видно, что отклонение высоты минимального сечения в обе стороны от номинального значения приводит к ухудшению интегральных характеристик сопла. Уменьшение числа Рейнольдса качественно не изменяет зависимостей  $\langle M \rangle_0$ ,  $\langle \sigma_p \rangle$ , но вызывает уменьшение их значений. Аналогичные зависимости получены в [7] для сопла с другой геометрией трансзвукового участка и номинальной степенью расширения  $S_n = 40$ .

Рассмотрим влияние продольного сдвига сопловых лопаток на интегральные характеристики течения и его структуру в сверхзвуковой части сопла. На фиг. 5 представлены распределения статического давления  $p$  на верхних (1) и нижних (2) стенках сопел с отношением  $h' = 1$  при различных величинах относительного продольного сдвига сопловых лопаток  $\Delta l$  ( $\Delta l = \Delta l_c / l$ , где  $\Delta l_c$  — абсолютный сдвиг сопловых лопаток, штриховая кривая —  $\Delta l = 1,1$ , сплошная кривая —  $0,5$ , штрихпунктирная кри-



Фиг. 4



Фиг. 5

вая — 0). В верхнем правом углу схематично представлены картины течения: *a* —  $\Delta l = 0$ , *b* — 0,5, *c* — 1,1. Сечение  $X=0$  проходит через задние угловые точки сопла с  $\Delta l = 0$ .

При  $\Delta l = 0$  (фиг. 5, *a*) за передними угловыми точками возникают зоны торможения. Распространяющиеся от них волны сжатия попадают в область задних угловых точек. За задними угловыми точками также формируются волны сжатия, которые достигают противоположной стенки сопла на расстоянии  $X \approx 7$  от задней угловой точки. При сдвиге  $\Delta l = 0,5$  (фиг. 5, *b*) зона торможения за нижней передней угловой точкой пропадает. За верхней передней угловой точкой размер зоны торможения увеличивается и сформировавшийся здесь скачок уплотнения приходит на нижнюю стенку сопла при  $X \approx 1$ . За задними угловыми точками слабая зона торможения существует лишь на нижней стенке сопла. При увеличении  $\Delta l$  (фиг. 5, *c*,  $\Delta l = 1,1$ ) в минимальном сечении образуется более прямая звуковая линия, так как совмещаются угловые точки. Кроме того, на верхней стенке сопла, в области участка постоянной высоты значительно уменьшается интенсивность зоны торможения из-за приходящих с противоположной стенки волн разряжения.

Газовый поток у нижней стенки сопла более равномерен, чем в предыдущем случае ( $\Delta l = 0,5$ ), и соответственно уменьшается интенсивность зоны торможения за задней угловой точкой. Это непосредственно сказывается на интегральных характеристиках течения. Средние величины коэффициента сохранения полного давления  $\langle \sigma_p \rangle$  и относительного числа Маха  $\langle M \rangle_0$  при  $\Delta l = 1,1$  выше, чем в случае  $\Delta l = 0,5$ , во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса ( $10^4 - 10^5$ ). Аналогичная картина течения в сверхзвуковой части сопла сохраняется и при других значениях величины  $h'$ .

Общая картина изменения интегральных характеристик течения при различных величинах продольного и поперечного сдвига сопловых лопаток также представлено на фиг. 4 (точки 2 —  $\Delta l = 0$ , 5 — 0,5, 4 — 1,1,  $Re_{h^*} = 4 \cdot 10^4$ ). Видно, что при всех значениях  $h'$  интегральные характеристики течения максимальны при отсутствии продольного сдвига. При увеличении сдвига  $\Delta l$  от 0 до 0,5 интегральные характеристики течения уменьшаются для любых значений  $h'$ . Дальнейшее увеличение сдвига до  $\Delta l = 1,1$  приводит к росту  $\langle M \rangle_0$  и  $\langle \sigma_p \rangle$ .

В заключение отметим следующее. Длина участка постоянной высоты и вязкие эффекты оказывают существенное влияние на структуру течения газового потока в трансзвуковой области сопла. Так, при  $Re_{h^*}/l_n > 10^4$  течение в трансзвуковой области характеризуется тем, что переход через

скорость звука осуществляется в окрестности передней угловой точки. При  $Re_{h^*}/l_n < 10^4$  в окрестности передней угловой точки существуют локальные сверхзвуковые зоны, а звуковая линия образуется в окрестности задней угловой точки. При  $Re_{h^*}/l_n < 4 \cdot 10^3$  локальные сверхзвуковые зоны в окрестности передней угловой точки исчезают.

Результаты численных расчетов стационарного двумерного течения идеального газа, полученные методом установления [5], удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными при  $Re_{h^*}/l_n > 10^4$ . При меньших значениях параметра  $Re_{h^*}/l_n$  картина трансзвукового течения, полученная в расчетах, не только количественно, но и качественно не соответствует реальной.

При изменении величины продольного сдвига сопловых лопаток от  $\Delta l = 0$  до  $l$  (где  $l$  — длина участка постоянной высоты в области минимального сечения) и фиксированной величине  $h' = 1,0$  интегральные характеристики течения  $\langle M \rangle_0$  и  $\langle \sigma_p \rangle$  уменьшаются на 10–15%, причем наименьшее их значение достигается при  $\Delta l \approx 0,5l$ .

В диапазоне поперечных отклонений  $1,3h_{*H} \geq h_* \geq 0,2h_{*H}$  и изменения величины продольного сдвига сопловых лопаток от  $\Delta l = 0$  до  $\Delta l = l$  интегральные характеристики течения  $\langle M \rangle$  и  $\langle \sigma_p \rangle$  уменьшаются до 40% их максимальных значений, достигнутых при  $h' = 1,0$  и  $\Delta l = 0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворецкий В. М. Исследование влияния формы сопла на характеристики пространственных до- и сверхзвуковых течений // Изв. АН СССР. МЖГ. 1976. № 6. С. 147–151.
2. Сальников В. А. Об особенностях течения колебательно-релаксирующего газа в соплах с участком постоянного сечения в области горла // ПМТФ. 1984. № 3. С. 61–66.
3. Чефанов В. М. Течение газа в области горла сверхзвукового сопла // Газодинамика двигателей летательных аппаратов. Вып. 1. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1978. С. 18–25.
4. Тагиров Р. К., Чефанов В. М. Расчетно-экспериментальное исследование газодинамики плоских симметричных сопел, имеющих участок постоянной высоты и две точки излома контура в области критического сечения // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 100–105.
5. Иванов М. Я., Сальников В. А. К расчету течения газа в сопле Лавалия при наличии неравновесных физико-химических процессов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1982. № 4. С. 173–177.
6. Пирумов У. Г. Исследование течения в до- и трансзвуковой областях сопла Лавалия // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 1. С. 53–63.
7. Кгалхерман М. Г., Мальков В. М., Малявин В. П. и др. Экспериментальное исследование аэродинамики сопла ГДЛ // Газодинамика проточной части ГДЛ. Новосибирск, 1987. С. 41–53.

Москва

Поступила в редакцию  
25.V.1989