

УДК 533.6.011

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАЗОДИНАМИКИ ПЛОСКИХ СИММЕТРИЧНЫХ СОПЕЛ,
ИМЕЮЩИХ УЧАСТОК ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ И ДВЕ ТОЧКИ
ИЗЛОМА КОНТУРА В ОБЛАСТИ КРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ**

ТАГИРОВ Р. К., ЧЕФАНОВ В. М.

На основе расчетно-экспериментального исследования получены распределения давления вдоль стенок сужающихся-расширяющихся плоских симметричных сопел, имеющих участок постоянной высоты в области критического сечения. Установлено, что расчет в приближении плоского течения идеального газа в целом позволяет получать достоверные данные. Течение в основном определяется невязким ядром потока, влияние пограничных слоев относительно мало и проявляется лишь в местах резкого изменения давления. Наличие сужающейся части с прямолинейными стенками и участка постоянной высоты в критическом сечении вызывает заметное возмущение потока в начале расширяющейся части сопла, однако эти возмущения быстро затухают в продольном направлении.

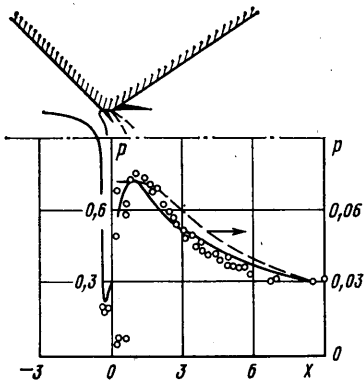
При применении в газодинамических установках плоских симметричных сужающихся-расширяющихся сопел, имеющих точки излома контура в окрестности минимального сечения, необходимо знать их локальные и интегральные характеристики, уровень неравномерности параметров, газодинамическую картину течения, особенно в трансзвуковой области. Актуальность рассматриваемой задачи подчеркивается в [1], где показано что неравномерность параметров в трансзвуковой области сопла может оказать заметное влияние на формирование свойств рабочей среды.

Имеется мало работ, посвященных исследованию структуры течения в плоских соплах с точками излома контура в области критического сечения. В одной из наиболее полных в этом направлении работ [2] приведены результаты экспериментального исследования сопла с прямоугольным поперечным сечением и получены распределения давления и масляная визуализация течения на стенках. Однако для этого конкретного сопла с заданной длиной участка постоянной высоты в области критического сечения затруднительно получить достаточно полное представление о картине течения в силу присущих эксперименту ограничений. Газодинамическая структура течения является очень сложной. Происходит взаимодействие нарастающих с различной интенсивностью пограничных слоев вдоль профилированных и боковых стенок с неравномерным основным потоком. Это приводит к возникновению пространственных скачков уплотнения различной интенсивности в горизонтальных и вертикальных плоскостях. Измеренное в эксперименте распределение давления отражает результат этого взаимодействия и не всегда позволяет выявить первоисточники возмущения потока. Эта трудность усугубляется еще тем, что пограничные слои обладают способностью передавать возмущения типа повышения или понижения давления вверх по потоку.

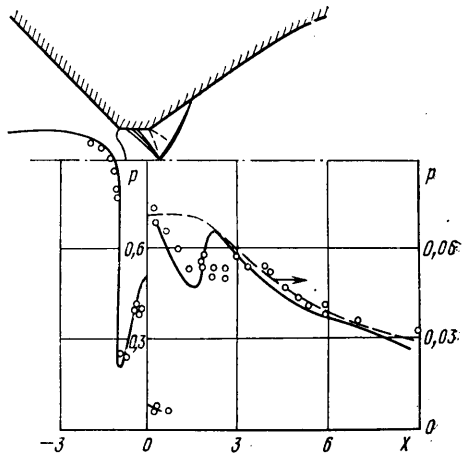
Для лучшего понимания особенностей течения в плоских соплах желательно физический эксперимент дополнить численным. Поскольку течение в рассматриваемом сопле с двумя боковыми стенками в своей основе является плоским, то естественно использовать для расчетов математи-

ческую модель, основанную на приближении плоского течения идеального газа. При этом можно надеяться, что сопоставление результатов расчета и эксперимента позволит выявить степень пригодности модели плоского течения и области влияния пограничного слоя. Помимо этого, целью проведенного расчетно-экспериментального исследования являлось определение влияния участка постоянной высоты в критическом сечении и его длины на параметры потока, выявление отрывных зон, построения приближенной картины течения и т. д.

Для расчета течения в до- и трансзвуковой областях сопла применялся метод установления с использованием конечно-разностной схемы С. К. Годунова. Здесь следует отметить, что наличие точек излома в трансзвуковой



Фиг. 1



Фиг. 2

области сопла не позволяет получать результаты с приемлемой точностью при простом использовании какого-либо конечно-разностного метода. Для преодоления этой трудности в данной работе был применен метод выделения подобласти течения, дополнительного измельчения сетки и экстраполяции параметров на нулевой размер ячейки [3]. Течение в сверхзвуковой части рассчитывалось методом «сквозного счета» [4].

Исследованные сопла имели одну и ту же сужающуюся часть с углом наклона прямолинейной стенки 45° и безразмерной полувысотой входного сечения 5 (линейные размеры относятся к полувысоте критического сечения). Сопла отличались длиной участка постоянной высоты в критическом сечении ($l=0,4; 1; 2$) и контурами расширяющейся части. Последние были рассчитаны методом характеристик на получение равномерного потока с числами Маха $M=3,5; 4,5; 5$ в предположении прямолинейности звуковой линии. Расчеты показали, что реальная звуковая линия имеет криволинейную форму и образуется в окрестности передней точки излома. Поэтому сечение стыковки, с которого используется метод «сквозного счета» сверхзвуковых течений, было выбрано на расстоянии 0,3125 вниз по потоку от передней точки излома, т. е. в пределах участка постоянной высоты.

Экспериментальные модели плоских сопел с отношением сторон прямоугольного критического сечения 1 : 6 исследовались на газодинамическом стенде атмосферно-вакуумного типа. Были измерены давления вдоль сред-

ней линии профилированной стенки сопла и поперек боковой стенки в 10—15 сечениях. Кроме того, была использована масляная визуализация и фотографирование для выявления отрывных зон.

Исследования показали, что изменение числа M , на которое рассчитана сверхзвуковая часть сопла, слабо изменяет картину течения. Поэтому в качестве примера на фиг. 1—3 приводятся результаты только для одной формы сверхзвуковой части, соответствующей $M=4,5$, но для трех длин l участка постоянной высоты. Сплошными линиями нанесены рассчитанные распределения давления вдоль верхней профилированной стенки сопла, светлыми кружочками — экспериментальные величины (давления отнесены к полному давлению потока во входном сечении сопла).

В целом наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных, в особенности в сужающейся части и на участке постоянной высоты. В пределах всех исследованных трех длин l наблюдается область торможения потока, возникающая из-за обтекания передней точки излома контура неравномерным потоком [5]. При этом видно, что интенсивность повышения давления при $l=0,4$ существенно ниже, чем при $l=1$ и 2. Поэтому в последних двух вариантах следовало ожидать отрыва пограничного слоя за передней точкой излома контура.

Действительно, эксперимент с масляной визуализацией показал, что при $l=0,4$ отрыва нет, а при $l=1$ и 2 наблюдается отрывная зона на участке постоянной высоты. В то же время сравнительно хорошее совпадение на рассматриваемом участке расчетных (без учета сил вязкости) и экспериментальных (полученных с учетом сил вязкости) данных говорит о том, что пограничные слои, включая зону отрыва, оказывают слабое влияние на невязкое ядро потока. Их влияние проявляется на боковой стенке и в расширяющейся части сопла в местах резкого изменения давления.

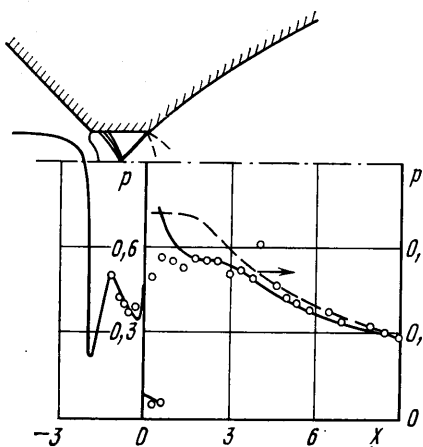
Для сопла с $l=0,4$, как видно из фиг. 1, непосредственно за задней точкой излома имеется локальная область повышения давления, возникающая по-прежнему из-за обтекания точки излома неравномерным потоком. При $l=1$ за задней точкой излома вначале идет участок понижения давления, а в сечении, соответствующем $x \approx 2$, происходит локальное повышение давления вследствие прихода на стенку отраженного от линии симметрии скачка уплотнения. Экспериментальные точки вблизи $x \approx 2$ показывают меньшее повышение давления, чем получено в расчете. Так и должно быть, поскольку измеренные величины давления отражают результат взаимодействия слабого скачка уплотнения с пограничным слоем. Под воздействием скачка увеличивается местная толщина пограничного слоя (отрыв в этом месте не обнаружен) и возмущения передаются вверх по потоку. В результате область воздействия скачка оказывается «размазанной» на некотором интервале длины стенки.

Наличие участка расширения потока непосредственно за задней точкой излома говорит о том, что эта точка обтекает практически равномерным потоком. Действительно, как видно из фиг. 4, где сплошными линиями показаны рассчитанные поперечные поля давления в пяти сечениях: $x=-1,22; 0; 1; 2; 8; 6,4$ (соответственно обозначенных буквами $a-d$), статическое давление в сечении задней точки излома ($x=0$) практически постоянно на участке от стенки до скачка уплотнения.

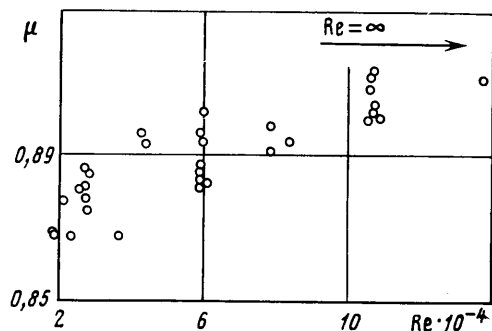
Для сравнения на фиг. 4 (точками показаны) экспериментальные величины давления, измеренные на боковой стенке сопла. Несмотря на наличие соответствующего пограничного слоя, в целом наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных полей давления. Исключение составляет сечение $x=0$, где имеется качественное различие данных.

Причину расхождения можно объяснить следующим образом. Волны сжатия на участке постоянной высоты вызывают утолщение пограничных слоев на верхней и боковых стенках. Очевидно, что наибольшую толщину пограничный слой по высоте боковой стенки имеет в месте стыковки с

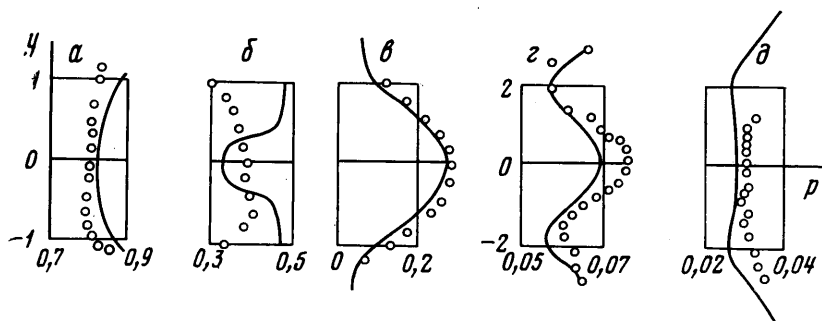
верхней стенкой. Утолщение пограничного слоя на верхней стенке включает также и отрывную зону. В результате пониженное давление за задней точкой излома передается через этот утолщенный пограничный слой на боковой стенке вверх по потоку и понижает давление, измеряемое на боковой стенке. Причем эта передача осуществляется тем сильнее, чем ближе точка измерения находится к линии пересечения боковой и верхней стенок.



Фиг. 3



Фиг. 5



Фиг. 4

Неожиданные и интересные результаты получены для сопла с $l=2$ (фиг. 3). Численные исследования показали, что волна сжатия пересекает линию симметрии в пределах участка постоянной высоты и в окрестности этой точки пересечения возникает местная дозвуковая зона течения. Отраженная от этого места волна сжатия достигает верхней стенки в непосредственной окрестности задней точки излома контура, за которой происходит резкое понижение давления в веере волн разрежения. Однако экспериментальные значения давлений за задней точкой излома контура показывают наличие небольшого участка повышения давления. Для понимания причины наблюдаемого расхождения были проведены дополнительные исследования.

В частности, был проведен эксперимент с $l=1,9$, который показал, что в этом случае происходит более интенсивное повышение давления за задней точкой излома, чем при $l=2$. Таким образом, оказалось, что распределение давления в окрестности задней точки излома очень чувствительно

к месту прихода отраженной волны сжатия. В численном эксперименте эта волна достигает стенки непосредственно перед точкой излома, как это видно из анализа кривой распределения давления вблизи $x \approx 0$ (фиг. 3). В физическом эксперименте соответствующая волна сжатия достигает стенки непосредственно за точкой излома контура из-за возможных погрешностей изготовления модели и несколько другой интенсивности волн сжатия. Это и приводит к расхождению сравниваемых давлений в окрестности $x \approx 0$ на фиг. 3.

Экспериментальные значения коэффициента расхода μ для разных чисел Рейнольдса, определенных по параметрам потока в критическом сечении сопла $M=4,5$, $l=1$, показаны на фиг. 5.

Расчет методом установления для двух разных сеток и экстраполяция на нулевой размер ячейки позволил найти значение коэффициента расхода для идеального газа ($Re=\infty$), равное 0,92. Как видно, экспериментальные значения μ по мере увеличения числа Re приближаются к теоретическому значению, т. е. можно считать, что имеет место удовлетворительное соответствие.

Исследованные сопла имели достаточно большую длину. Например, длина сверхзвуковой части сопла $M=4,5$ была равна 90. Поэтому, как было установлено из соответствующих сравнений, нарастающие пограничные слои вдоль всех четырех стенок экспериментальной модели сопла с некоторого сечения приводят к уменьшению эффективной площади канала сверхзвуковой части. В результате измеренные давления вблизи выходного сечения сопла оказываются выше рассчитанных.

Полученная в рамках данной работы информация не является достаточной для построения всей сложной структуры исследуемого течения. Но в общих чертах картину течения в трансзвуковой области можно попытаться представить, зная распределения давления вдоль верхней стенки, вдоль линии симметрии и в поперечных сечениях. Полученные на основе такого анализа основные волны сжатия в трансзвуковой области схематично показаны в верхних частях фиг. 1–3 толстыми линиями.

Конечно, ряд особенностей течения и тонкая структура взаимодействия пограничных слоев с невязким ядром потока остаются за пределами вышеуказанного упрощенного анализа. В частности, масляная визуализация показала, что в окрестности сечения, в котором расположены задние точки излома, по-видимому, в местах утолщения пограничных слоев на боковых стенках образуются скачки уплотнения, поверхности которых ориентированы в поперечном направлении. Эти скачки оставляют X-образный след на верхней и нижней профилированных стенках сверхзвуковой части сопла. Для более точного представления картины течения, в особенности с учетом влияния пограничных слоев и трехмерных возмущений, требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Тем не менее проведенные в данной работе расчетно-экспериментальные исследования помимо фактического материала по распределению давления дают возможность сделать ряд важных выводов.

Расчет в приближении плоского течения позволяет получать вполне достоверные результаты, по крайней мере для исследованных сопел с отношением сторон 1 : 6 в критическом сечении.

Картина течения определяется в основном невязким ядром потока, влияние пограничных слоев относительно мало. Это влияние заметно проявляется лишь в местах резкого изменения давления (области взаимодействия с волнами сжатия, точки излома контура). Наличие сужающейся части с прямолинейными стенками и участка постоянной высоты в критическом сечении вызывает заметное возмущение потока в начале расширяющейся части сопла. Однако эти возмущения быстро затухают в продольном направлении.

Интересно, что с некоторого сечения продольное распределение давления практически начинает совпадать с распределением, вычисленным по методу характеристик при предположении прямолинейности звуковой линии (штриховые линии на фиг. 1–3). Число M , на которое рассчитана сверхзвуковая часть сопла, т. е. форма контура сверхзвуковой части из рассмотренного семейства сопел, слабо влияет на общую картину течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков А. С., Сериков Р. И., Старик А. И., Шелепин Л. А. Влияние неоднородностей параметров потока на характеристики рабочих сред CO_2 - и N_2O -газодинамических лазеров.— Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 4, с. 787–792.
2. Чефанов В. М. Течение газа в области горла сверхзвукового сопла.— В кн.: Газодинамика двигателей летательных аппаратов. Вып. 1. Казань, 1978, с. 18–25.
3. Тагиров Р. К. Теоретическое исследование течения идеального газа в сужающихся соплах.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1978, № 2, с. 198–202.
4. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. К., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
5. Камзолов В. Н., Пирумов У. Г. Расчетное исследование сверхзвуковой струи, истекающей из отверстия с плоскими стенками.— ПМТФ, 1967, № 2, с. 117–122.

Москва, Казань

Поступила в редакцию
8.II.1982