

УДК 533.6.011.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМОВ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КОЛЬЦЕВОГО СОПЛА С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Ф. А. ВИЛЕНСКИЙ, Т. Г. ВОЛКОНСКАЯ, В. П. ГРЯЗНОВ,
У. Г. ПИРУМОВ

(Москва)

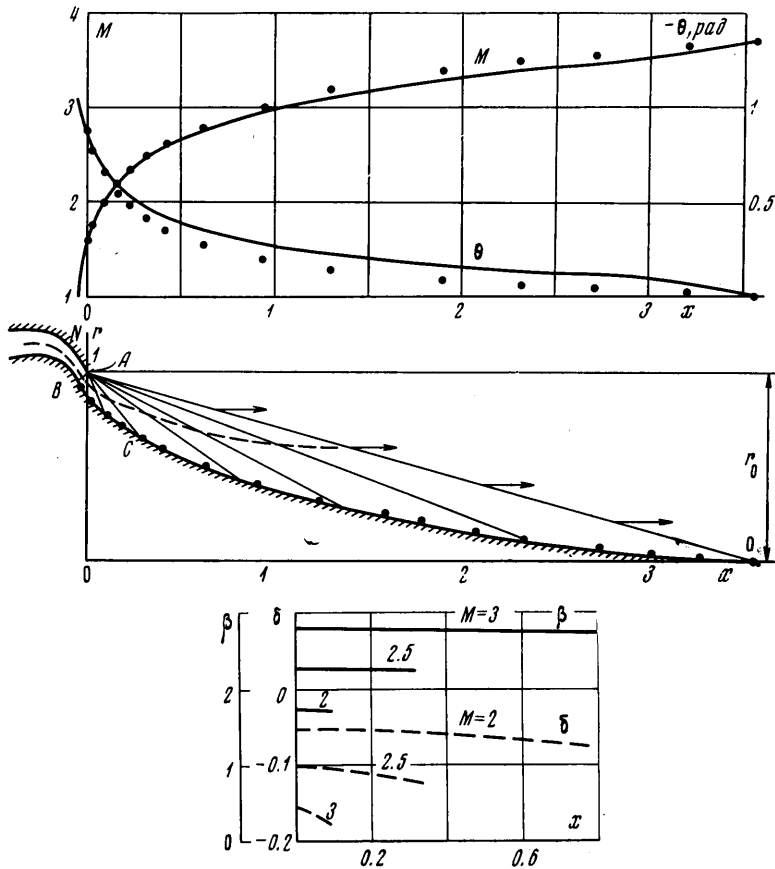
Представлены результаты расчетов и экспериментального исследования нерасчетных режимов кольцевого сопла с центральным телом, когда внешнее давление p_n превышает давление p^* , определенное в одномерном приближении по отношению площади выходного сечения сопла к площади критического сечения. Имеющееся в настоящее время достаточно большое число публикаций [1-8] посвящено либо точному или приближенному численному исследованию расчетных режимов, когда $p_n = p^*$ [1-5], либо экспериментальному исследованию в основном интегральных характеристик кольцевых сопел таких, как коэффициент тяги или коэффициент расхода на нерасчетных режимах [6, 7].

Однако отсутствуют как расчетные, так и экспериментальные данные, которые позволили бы получить представление о локальной структуре потока в кольцевых соплах на нерасчетных режимах. Данная работа в какой-то мере восполняет этот пробел. В качестве объекта исследования выбрано кольцевое сопло с центральным телом, которое в американской литературе [6] классифицируется как сопло с внешним расширением, а в отечественной иногда называется соплом с прикрытой обечайкой (фиг. 1, а). Экспериментально было установлено [6, 7], что такое сопло обладает наилучшим коэффициентом тяги на нерасчетных режимах по сравнению не только с обычным соплом Лавала, но и с другими многочисленными схемами кольцевых сопел (сопло с частично внешним расширением, сопло с прямолинейной и параллельной оси внешней стенкой, тарельчатое сопло и т. д.).

Методом характеристик проведен расчет течения газа в кольцевой области, заключенной между свободной границей и контуром центрального тела, при нерасчетных режимах $p_n > p^*$. Проведено экспериментальное исследование течения, в процессе которого на стенке сопла производились измерения статического давления, а также визуализация течения путем теневого фотографирования потока. Результаты расчетного и экспериментального исследования представлены для кольцевого сопла с $M^* = 3.71$ и идеального газа с постоянным показателем адиабаты $\kappa = 1.4$.

1. Схема течения в исследуемом кольцевом сопле на расчетном режиме представлена на фиг. 1, а. Начиная от криволинейной звуковой линии AB , происходит расширение потока в веере волн разрежения $ABCO$ с центром в точке A , в которой имеет место течение Прандтля — Майера. Расширение в точке A происходит при этом до давления, равного атмосферному. Форма трансзвуковой области и наклон обечайки AN подбираются так, чтобы в этом случае направление вектора скорости в точке A было параллельным оси. В связи с этим контур центрального тела рассчитывается таким образом, чтобы на расчетном режиме на замыкающей характеристике AO поток был параллелен оси. Расчет контура в осесимметричном случае производится методом характеристик [2, 3], при этом на характеристике второго семейства AO задается числом M^* , затем течение обращается, и рассчитывается течение сжатия с центром в точке A . Расчет производится до достижения числа $M = 1$ в угловой точке, а контур сопла определяется как линия тока с расходом, равным расходу через характеристику AO . Примеры расчетов такого рода и некоторые таблицы контуров сопел даны в работе [3]. Очевидно, что построенный таким образом контур сопла для течения идеального газа без вязкости реализует максимум тяги при фиксированной площади выхода.

Отметим некоторые особенности течения на расчетном режиме. В силу того, что минимальное сечение достаточно удалено от оси симметрии в некоторой окрестности этого сечения течение можно без внесения заметной ошибки рассматривать как плоское, а осесимметричный веер волн разрежения рассматривать как центрированное плоское течение Прандтля — Майера. Это достаточно очевидное свойство течения послужило основой для создания элементарного приближенного метода прямолинейных характеристик [2-5], согласно которому параметры на характеристиках считаются постоянными, а сами они — прямолинейными, при этом осесимметричность течения учитывалась лишь уравнением расхода. Для рассматриваемого

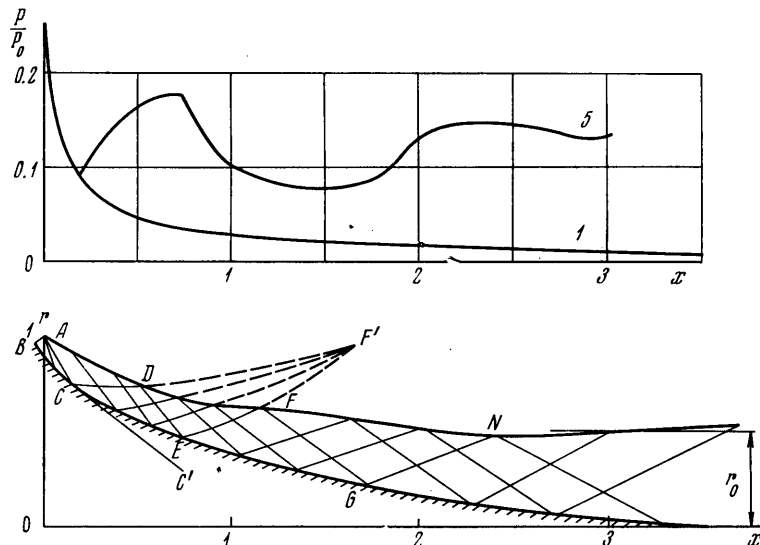


Фиг. 1

мого типа кольцевого сопла на расчетном режиме этот метод дает довольно точное описание как параметров течения, так и контура центрального тела. Сравнение результатов расчетов, полученных точным методом характеристик и приближенным методом прямолинейных характеристик, дано на фиг. 1а и фиг. 1б. При этом на фиг. 1а представлены некоторые характеристики второго семейства, контур центрального тела и распределение числа M и угла θ — наклона скорости к оси x на теле, а на фиг. 1, б — распределение числа $\beta = \sqrt{M^2 - 1}$ и величины $\delta = \text{tg } \theta / 4$ на характеристиках, имеющих в точках на контуре значения числа $M = 2, 2.5$ и 3 . На фиг. 1а сплошными линиями нанесены результаты точного расчета, а темными кружочками — приближенного.

При нерасчетных режимах с $p_n > p^\circ$ течение газа рассчитывается в кольцевой области (фиг. 2) между границей струи и центральным телом, контур которого рассчитан описанным выше способом. Для расчета этого течения использован вариант метода характеристик работы [9], приспособленный для расчета истечения недорасширенной струи в затопленное пространство с той лишь разницей, что вместо граничного условия на оси симметрии используется условие непротекания на поверхности тела. На границе струи используется естественное условие $p = p_n$.

Расчет течения при $p_n > p^\circ$ в кольцевой области между струей и контуром тела начинается от характеристики веера волн разрежения АС,



Фиг. 2

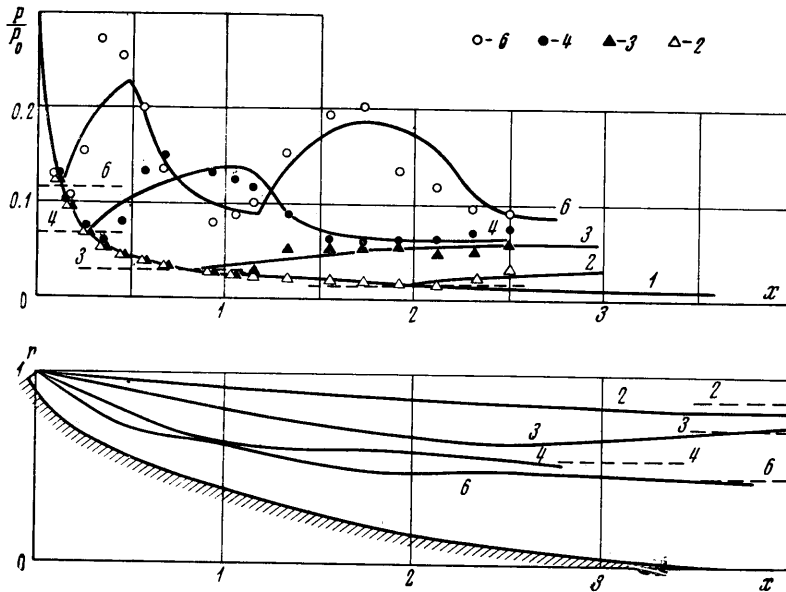
в точке А которой давление равно атмосферному. Естественно, что вверх по потоку от этой характеристики параметры потока такие же, как и на расчетном режиме при $p_n = p^\circ$. В результате расчета определяются границы струи, параметры в поле течения, и в частности на контуре тела. Расчет производится по характеристикам первого семейства¹.

Прежде чем переходить к анализу результатов расчетов, следует отметить, что для большинства типов сопел расчет течения на нерасчетных режимах представляет весьма сложную задачу. Это связано в первую очередь с тем, что определяющее влияние на этих режимах имеют вязкие эффекты и течения в отрывных зонах, пока не поддающиеся достаточно строгому описанию. Для расчета течения в этих областях развиваются полуэмпирические методы. Расчет методом установления нерасчетного течения в кольцевом сопле с прямолинейной верхней стенкой в рамках идеальной жидкости сделан в работе [8]. Однако в этой работе не учитываются вязкие эффекты, в связи с чем представленные в ней результаты для нерасчетного течения носят качественный характер.

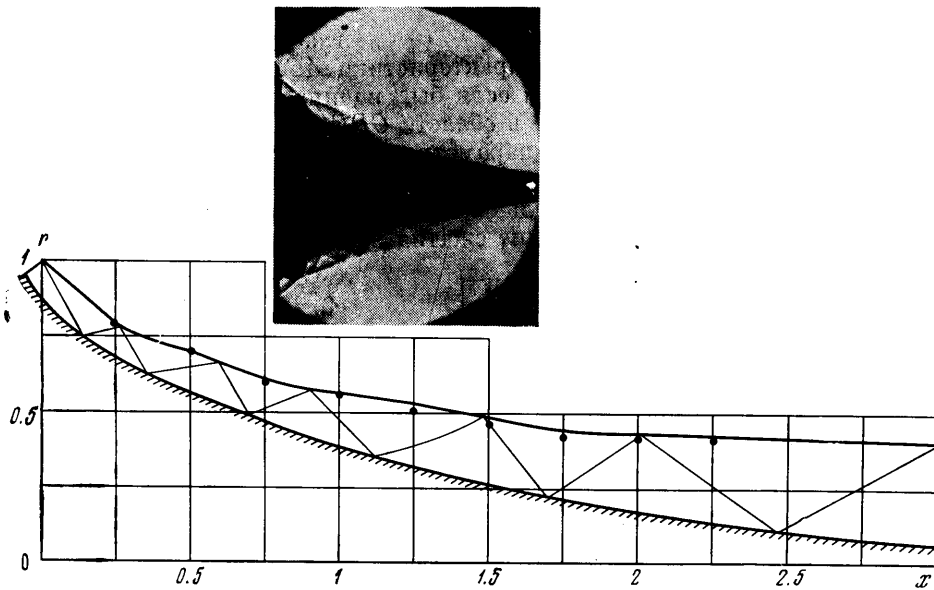
Нерасчетные режимы рассматриваемого в работе кольцевого сопла относятся к тем немногочисленным примерам нерасчетных режимов, которые удастся рассчитать достаточно точно, поскольку, как показывают расчеты, в области течения не возникают ударные волны.

¹ Аверенкова Г. И., Волконская Т. Г., Егорова Н. И. Программы расчета неэнтальпических течений идеального газа. Ротапринт ВЦ МГУ, Сер. прогр. реш. прикл. матем. задач, 1969, вып. 4, 6.

На фиг. 2—6 представлены результаты расчетов для кольцевого сопла, имеющего на расчетном режиме число M° в выходном сечении, равное 3.71, и значение $p^\circ = 0.01$, отнесенное к давлению торможения. На этих фигурах значение p° отнесено к давлению p_n , а точка A имеет координаты



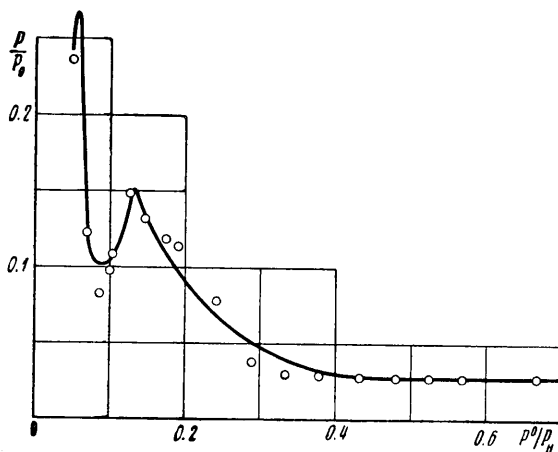
Фиг. 3



Фиг. 4

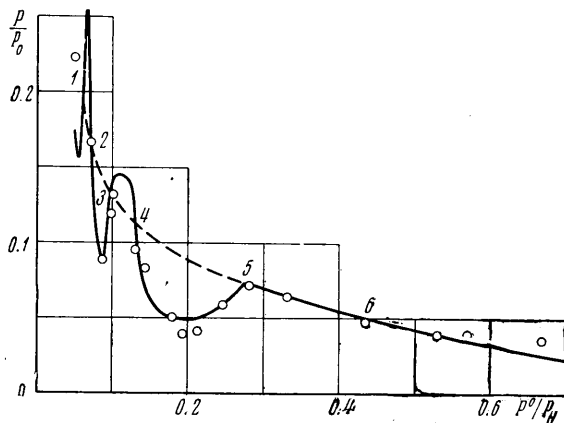
(0, 1). Диапазон изменения p° / p_n в расчетах $0.05 \div 1$. Типичная геометрия струи и характеристик первого и второго семейств, а также распределение статистического давления p , отнесенного к давлению торможения p_0 , на поверхности тела представлены на фиг. 2—4. На фиг. 2, 3 цифрой 1

обозначены кривые, соответствующие $p^0/p_n = 1, 2 - 0.67, 3 - 0.379, 4 - 0.148, 5 - 0.112, 6 - 0.087$. На фиг. 4 $p^0/p_n = 0.0511$. Очевидна волнообразная структура границы струи и распределения давления на теле, что вызвано отражением чередующихся волн разрежения и сжатия от границы струи и тела. Действительно, характеристики AC, CD, DE, EF, FG, GN и т. д. разделяют различные аналитические области течения, при этом на самих этих характеристиках терпят разрывы производные газодинамических параметров и кривизна линий тока, в том числе и граница струи. Так, характеристика AC отделяет аналитическое течение разрежения ABC от течения в треугольнике ACD , определяемом параметрами на этой характеристике и на границе



Фиг. 5

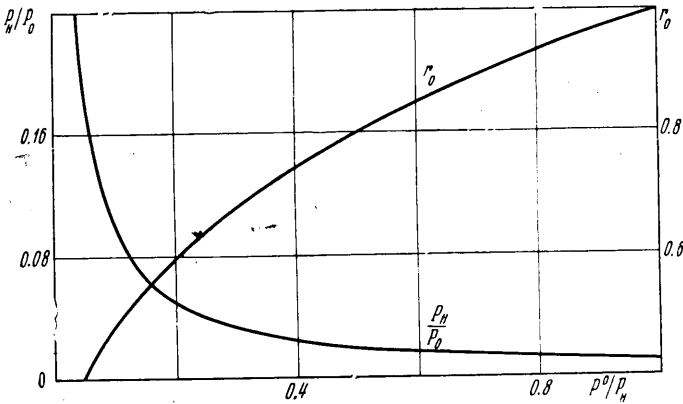
с достаточной точностью. Тогда характеристики AC, CD и граница струи AD являются прямолинейными, и если бы, начиная от точки C , контур тела CC' был прямолинейным, то в области CDE имело бы место поступательное течение с постоянными параметрами. Однако в силу кривизны стенки CE в этой области возникает течение сжатия, аналогичное течению сжатия при обтекании поступательным сверхзвуковым потоком вогнутой стенки. Известно, что такое течение сжатия замыкается висячим скачком, начинающимся в точке пересечения характеристик F' . На фиг. 2 пунктиром изображены характеристики условного течения сжатия, которое возникало бы в случае, когда в некоторой области над линией AD , как и между характеристиками AC и CD , имело место поступательное течение с $p = p^0$. Точка F' , вообще говоря, может находиться как внутри, так и вне струи. Однако проведенные расчеты показывают, что точка F' распола-



Фиг. 6

характеристике и на границе струи; характеристика CD отделяет течение сжатия в области CDE , определяемое контуром тела и параметрами на характеристике CD , от течения в треугольнике ACD . Разрывы производных в распределении давления на теле возникают соответственно в точках C, E и G (см. фиг. 2). Важным для понимания структуры течения является тот факт, что в треугольнике CDE имеет место течение сжатия. Для объяснения этого факта примем, что в этой области течение плоское, что согласно фиг. 1 выполняется

гается всегда вне струи. Волны сжатия, возникающие в треугольнике CDE , отражаются от границы струи в виде волн разрежения. Волны разрежения, попадая на границу тела, отражаются также волнами разрежения, а от границы струи — в виде волн сжатия и т. д. Дальнейшая структура течения определяется чередующейся системой волн разрежения и сжатия, отражающихся от стенки и границы струи, при этом при отражении от жесткой стенки интенсивность волн сохраняется по величине и знаку, а при отражении от границы струи сохраняется по величине, но меняется по знаку. Отметим еще две интересные особенности течения на нерасчетном режиме. Отклонение распределения давления на контуре тела при нерасчетном течении от распределения давления, соот-



Фиг. 7

ветствующего расчетному течению согласно результатам расчетов, происходит при давлении, равном p_n . На фиг. 3 значения p_n/p_0 показаны пунктиром. Для исследуемого сопла значения p_n/p_0 в зависимости от p^0/p_n представлены на фиг. 7.

Согласно результатам расчетов, в кольцевой области между границей струи и контуром тела ударных волн не возникает и течение является изэнтропическим. В связи с этим на достаточном удалении от тела параметры течения практически выравниваются, давление в сечении становится равным атмосферному, а вектор скорости — параллельным оси. При заданных p^0/p_n и M^0 , воспользовавшись уравнением неразрывности, можно определить радиус r_0 изобарического сечения струи, в которой давление равно атмосферному, а вектор скорости параллелен оси. Для исследуемого сопла значения r_0 в зависимости от p^0/p_n представлены на фиг. 7. При этом величины p_n/p_0 и r_0 определяются из соотношений

$$p_n/p_0 = \pi(M_0), \quad r_0 = [q(M^0)/q(M_0)]^{1/2}$$

где M_0 — число Маха в изобарическом сечении, определяемое из первого соотношения, а $\pi(M)$ и $q(M)$ — газодинамические функции давления и расхода. Значения r_0 представлены пунктиром на фиг. 2—4. Как видно из этих фигур, уже в окрестности концевого участка центрального тела радиус струи незначительно отличается от r_0 , т. е. выравнивание течения происходит достаточно быстро. Изэнтропичность течения приводит к тому, что в рамках идеальной жидкости коэффициент тяги исследуемой схемы сопла с полным центральным телом на нерасчетных режимах равен единице, т. е. рассматриваемое сопло обладает идеальным саморегулированием. Коэффициент тяги определяется как отношение действительной тяги сопла к тяге идеального сопла, имеющего на срезе параллельный оси поток, давление, равное атмосферному, расход такой же, как у действительного сопла. Результаты расчета интеграла сил давления, спроектированных на ось x , дают также величину коэффициента тяги, равную единице. Этот результат, хотя и является достаточно тривиальным, если предположить изэнтропичность течения и отсутствие вязкости, в известной авторам литературе не отмечался. Естественно, что наличие вязкости и укороч-

чение центрального тела из условия минимума суммарных потерь с учетом трения, весового эквивалента и т. д. приводят к тому, что в реальных конструкциях коэффициент тяги на нерасчетных режимах рассматриваемой схемы кольцевого сопла несколько отличается от единицы, но незначительно, и такая схема сопла обладает наилучшими тяговыми характеристиками по сравнению с другими схемами.

Представляет интерес рассмотреть зависимость статического давления в фиксированной точке тела от отношения p°/p_n . Такого рода зависимости представлены на фиг. 5 и фиг. 6 для значений $x = 0.93$ и 2.51 соответственно.

Нетрудно видеть, что эти зависимости носят также колебательный характер, а немонотонное изменение давления связано с чередованием волн разрежения и сжатия. Существенно при этом, что в диапазоне от 0.05 до 0.2 (см. фиг. 6) небольшое изменение p°/p_n приводит к весьма заметному изменению давления в точке. Такое резкое изменение связано с тем, что для точек, расположенных в окрестности граничных характеристик AC , EF , FG (фиг. 2) и т. д., небольшие изменения p°/p_n приводят к тому, что точка из области разрежения (сжатия) попадает в область сжатия (разрежения), а поскольку при малых p°/p_n протяженность таких областей значительно меньше, чем при больших (ср. фиг. 2 и фиг. 4), то происходит многократное появление максимумов и минимумов в зависимости p/p_0 от p°/p_n (см. фиг. 5 и фиг. 6). Начиная с некоторого значения p°/p_n (равного 0.4 на фиг. 5 и 0.25 на фиг. 6), давление в точке или вовсе перестает зависеть от p°/p_n , так как рассматриваемая точка находится уже на отрезке BC , на котором давление не зависит от внешнего давления (см. фиг. 5), или монотонно уменьшается (см. фиг. 6), поскольку точка при увеличении p°/p_n остается в области сжатия CDE , а с уменьшением p_n давление в этой области падает до наступления автотельного режима.

В связи с отмеченным фактом резкой немонотонности следует сделать два замечания. Во-первых, для установления факта немонотонности требуется тщательное расчетное или экспериментальное локальное исследование всей области течения, поскольку, например, имея на фиг. 6 лишь группу точек 1—6, можно провести монотонную зависимость (она показана пунктиром), которая совершенно не будет отражать структуру потока в этой области. Во-вторых, наличие острых максимумов и минимумов делает систему кольцевая струя — внешний поток неустойчивой к малым возмущениям как внешнего потока, так и потока внутри сопла, что может приводить к пульсациям давления на стенке сопла. Этот факт следует учитывать для реальных конструкций.

2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено на фиг. 3—6. На фиг. 3 сплошными кривыми показаны расчетные значения давления при различных p°/p_n , а различными значками — экспериментальные значения при тех же значениях параметров. Из рассмотрения этой фигуры следует, что на отрезке BC (фиг. 2) контура (длина этого отрезка возрастает с увеличением p°/p_n) расчетные и экспериментальные значения количественно хорошо согласуются между собой. В остальной области течения экспериментальные и расчетные значения качественно согласуются между собой, показывая немонотонный характер зависимости при малых p°/p_n . Однако в областях максимумов и минимумов давления имеются некоторые количественные расхождения в величине давления, при этом в эксперименте, как правило, в окрестности минимума давления ниже, а в области максимума — выше, чем в расчете. На других участках кривые расчетные и экспериментальные значения достаточно хорошо согласуются между собой. Отмеченное расхождение в области экстремумов может быть связано как с некоторой эжекцией внешней среды струей, что может снизить эффективное значение p_n , так и с отличием параметров на начальной характеристике AB в расчете и эксперименте, поскольку в расчете не учитывалась форма поверхности перехода и форма трансзвуковой области. В то же время характер течения в этой области достаточно сложен [10, 11]. Однако, несмотря на некоторое различие в распределении давления, значения тяги сопла, определенные экспериментально и в результате расчетов, хорошо согласуются между собой.

На фиг. 4 для $p^{\circ}/p_n = 0.0511$ представлена граница струи и геометрии характеристик первого и второго семейств, полученных в расчете. Там же представлена тепловая фотография течения для этого случая. Черными точками на графике показаны определенные по этой фотографии граница струи и характеристики. И в этом случае видно хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными как по числу «бочек», так и по форме границы струи и положению характеристик.

На фиг. 5 и 6 сравниваются экспериментальные и расчетные значения относительного давления p/p_0 в фиксированных точках ($x = 0.93$ и $x = 2.51$ соответственно) в зависимости от p°/p_n . Видно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Как расчетные, так и экспериментальные данные указывают на немонотонную зависимость p/p_0 от p°/p_n в фиксированной точке контура центрального тела.

Поступило 26 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Кацкова О. Н. Расчет кольцевых сверхзвуковых сопел и диффузоров. Вычислит. матем., 1958, № 3.
2. Пирумов У. Г., Рубцов В. А. Расчет осесимметричных сверхзвуковых кольцевых сопел. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1961, № 6.
3. Межибовская Е. Г., Пирумов У. Г., Рубцов В. А., Сорокина Е. В. Расчет кольцевых осесимметричных сопел. Тр. ВЦ МГУ, 1961.
4. Greer H. Rapid method for plug nozzle design. ARS Journal, 1961, vol. 31, No. 4.
5. Angelino G. Approximate method for plug nozzle design. AIAA Journal, 1964, № 10. (Рус. перев.: Приближенный метод профилирования сопла с центральным телом. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 10.)
6. Migdal, Horgan, Chama. An experimental evaluation of plug cluster nozzles. AIAA Journal, 1964, № 7. (Рус. перев.: Экспериментальная оценка характеристик многосопельной компоновки с общим центральным телом. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 7.)
7. Bergman K. The plug nozzle: a new approach to engine design. Astronautics, April, 1960.
8. Иванов М. Я. Применение метода установления к анализу нерасчетных режимов течения в осесимметричных соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 6.
9. Волконская Т. Г. Расчет сверхзвуковых осесимметричных струй. Сб. «Численные методы в газовой динамике», вып. 2, Изд. МГУ, 1963.
10. Hopkins D. F., Hill D. E. Transonic flow in unconventional nozzles. AIAA Journal, 1968, No. 5. (Рус. перев.: Околосуперзвуковое течение в соплах необычной формы. Ракетная техника и космонавтика, 1968, № 5.)
11. Овсянников А. М. Расчет течения в дозвуковой и трансзвуковой частях кольцевых сопел. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 6.