

(2.3) и (2.5) приводит к определению функций k_i с погрешностями Δk_i , которые обусловлены погрешностями разностного решения. Погрешности Δk_i для числа пространственных шагов разностной сетки $N=60$ показаны на фиг. 1. Как показывают расчеты, при изменении N в диапазоне 60–20 погрешности линейно возрастают.

Описанный способ позволяет определить относительные проницаемости, очевидно, лишь для тех значений насыщенности, которые реализуются в рассматриваемом автомодельном течении, т. е. в тех точках плоскости (s_1, s_2) , которые принадлежат характеристикам уравнения (1.1), отвечающим данным начальным и граничным условиям. Если относительные проницаемости зависят от двух переменных, то для их определения необходимо проводить серию экспериментов, варьируя условия таким образом, чтобы характеристики достаточно плотно покрывали область изменения насыщенности.

В следующем примере в отличие от предыдущего было принято $k_3 = s_3^2(50s_1^2 + 2s_2^2 + s_3^2)^{-1}$, начальная газонасыщенность нулевая, начальная водонасыщенность: 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; $N=20$, остальные параметры те же. На фиг. 2 сплошными кривыми показаны линии уровня $k_3(s)$, штриховыми – линии уровня функции, найденной из решения обратной задачи.

Автор благодарен Б. В. Шалимову за обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Welge H. J.* A simplified method for computing oil recovery by gasor water drive. – Trans. AIME, 1952, v. 195, p. 91–98.
2. *Эфрос Д. А.* Определение относительных проницаемостей и функций распределения при вытеснении нефти водой. – Докл. АН СССР, 1956, т. 110, № 5, с. 746–749.
3. *Johnson E. F., Bossler D. P., Naumann V. O.* Calculation of relative permeability from displacement experiments. – Trans. AIME, 1959, v. 216, p. 370–372.
4. *Sarem A. M.* Three-phase relative permeability measurements by unsteady-state method. – Soc. Petrol. Engng. Journal, 1966, v. 6, № 3, p. 199–205.
5. *Шалимов Б. В.* О фильтрации трехфазной жидкости (модель Баклея – Леверетта). – Изв. АН СССР. МЖГ, 1972, № 1, с. 39–44.
6. *Шалимов Б. В.* Численное моделирование одномерной трехфазной фильтрации. – Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 6, с. 59–66.

Москва

Поступила в редакцию
21.VII.1983

УДК 533.6.011

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПЛА ЛАВАЛЯ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГОРЛОВИНОЙ

ДВОРЕЦКИЙ В. М., ПАНИН С. Д., ШИШКОВ А. А.

Приводятся результаты экспериментального и численного исследования смешанного течения и параметров теплопередачи в трансзвуковой области осесимметричного сопла Лавалья, горловина которого образована цилиндрической поверхностью, т. е. контур сопла вблизи минимального сечения содержит две угловые точки.

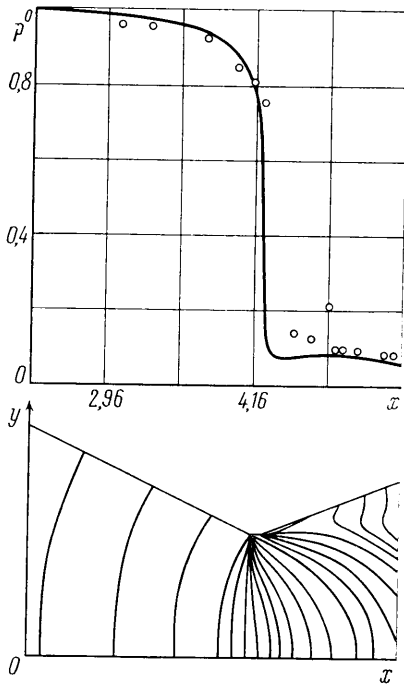
В известных работах [1–4], посвященных анализу особенностей внутренних трансзвуковых течений и параметров теплопередачи, рассматриваются сопловые тракты с гладким контуром горла либо с одной угловой точкой. Сопла сложной формы с цилиндрической горловиной исследовались в работах [5, 6], однако при этом определялись главным образом интегральные характеристики течения и не была отмечена такая особенность структуры потока, как наличие отрывной зоны вблизи критического сечения, выявленная к настоящему времени. Так, экспериментальное исследование плоских сопел с одной угловой точкой в горле и с малой геометрической степенью расширения [7] указывает на возможность появления особенностей в распределении локальных характеристик газового и теплового потоков в трансзвуковой области тракта с цилиндрической горловиной.

Данная работа содержит сопоставление результатов модельных испытаний и численных расчетов осесимметричного сопла Лавалья с двумя изломами контура в окрестности критического сечения. Распределение статического давления на стенке сопла в физическом эксперименте определялось с помощью дренажных отверстий. В качестве рабочего тела использовался холодный очищенный сухой воздух. Для исследования условий теплообмена в тракте применена металлическая лента с токоподводом.

Численные расчеты поля течения газа выполнены на основе метода установления по времени с использованием схемы С. К. Годунова. Опытные значения коэффициентов теплообмена и температуры восстановления сопоставлены с расчетными. На основе сравнительного анализа результатов измерений статического давления и

характера теплообмена показано, что цилиндрический участок в горле исследованного сопла обуславливает отрыв потока в окрестности точки излома профиля и возникновение скачка уплотнения при последующем присоединении струи к стенке.

1. Численные расчеты проведены с использованием прямоугольной системы координат x, y . Трансзвуковая часть исследуемого сопла изображена на фиг. 1, ось x совмещена с осью сопла. За характерный размер принят радиус цилиндра, образующего горловину тракта. Слева при $x=0$ сопло примыкает к цилиндрической трубе радиуса $R=2.3$. Длина цилиндрического участка в горле равна $l=0,086$. Угол наклона образующей сужающейся части $\alpha=24^\circ$, угол наклона образующей расширяющейся части к оси сопла $\beta=\alpha$. Расчетная область разбивалась на ячейки в осе-



Фиг. 1

вом и радиальном направлении, разностная сетка содержала $53 \times 50 = 2650$ ячеек. Газ полагался совершенным с показателем адиабаты $\kappa=1,4$.

Стационарное решение получается путем интегрирования нестационарных уравнений газодинамики, представляющих законы сохранения для осесимметричного течения невязкого и нетеплопроводного газа. Метод расчета и особенности его реализации применительно к рассматриваемому классу течений изложены в работе [8]. Отметим, что с учетом выводов [9] для повышения точности определения интегральных характеристик потока при контроле точности вычислений и оценке степени установления течения из распределения локальных параметров брались давление p и тангенс угла наклона вектора скорости к оси x . Для численных расчетов использовалась ЭВМ ЕС-1060, ограничение на объем оперативной памяти практически не налагалось, поэтому метод выделения областей с измельченным сетки [10] не применялся.

В нижней части фиг. 1 представлена картина линий $p=\text{const}$ в рассматриваемом сопле Лавала, полученная в результате расчета (здесь давление отнесено к произведению критической плотности на квадрат критической скорости). В области горловины уровни давления приведены с интервалом $\Delta p=0,1$. В верхней части фиг. 1 линиями изображено распределение статического давления по стенке сопла (в качестве характерного принято полное давление).

Из рассмотрения приведенных характеристик следует, что в поле течения в данном тракте не наблюдается существенного отличия от результатов двумерных расчетов гладких сопел и сопел с угловой точкой, описанных, например, в [3, 4]. Вместе с тем анализ особенностей течения в канале с внезапным сужением либо с большими углами конусности входного раструба, основанный на использовании интегральных соотношений и опытных данных, указывает на возможность отрыва потока в горловине сопла [11].

Примем расчетную схему течения в виде, изображенном на фиг. 2, где штриховой линией нанесена предполагаемая граница потока. Тогда отношение площа-

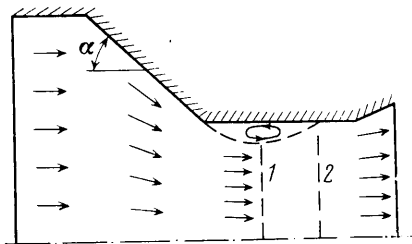
дей поперечных сечений 1 и 2 потока можно определить как [11]

$$\frac{F_1}{F_2} = \left(1 + 0,637 \frac{f(\lambda) - 1}{1 - \pi(\lambda)} \frac{\alpha}{90} \right)^{-1}$$

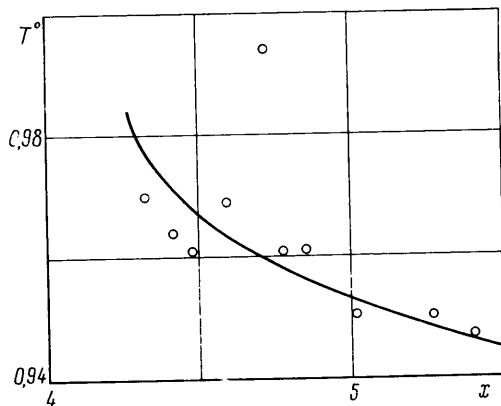
где $f(\lambda)$, $\pi(\lambda)$ — известные функции приведенной скорости потока λ .

Полагая, что в сечении потока с наименьшей площадью $\lambda \cong 1$, получим $F_1/F_2 \cong 0,9$. Последнее указывает на отрывной характер течения вблизи минимального сечения сопла. В этом случае распределение параметров, в частности статического давления по стенке сопла, не будет гладким.

Результаты воздушных продувок исследуемого тракта (точками нанесено распределение статического давления по стенке в верхней части фиг. 1) подтверждают



Фиг. 2



Фиг. 3

сделанный на основании приведенного расчета вывод о возможности отрыва потока в горловине тракта.

2. Модельное сопло с диаметром цилиндра в горловине $d=69,4$ мм (остальные размеры соответствуют фиг. 1) испытывалось на установке, где в качестве рабочего тела использовался холодный очищенный сухой воздух. Статическое давление потока у стенки тракта измерялось образцовыми манометрами путем отбора газа через дренажные отверстия диаметром 0,9 мм. Экспериментальное исследование проведено в диапазоне изменения давления торможения 1–3 МПа и включает более 30 продувок модельного сопла.

Сравнение расчетных и опытных данных свидетельствует о том, что поперечное сечение с минимальной площадью потока смещено вниз по течению относительно начала цилиндрического участка. В горловине образуется область возвратно-циркуляционного течения. Присоединение газовой струи к стенке сверхзвукового раструба сопровождается возникновением скачка уплотнения при $x \cong 4,75$, что приводит к возрастанию давления на стенке, более чем в 2 раза превышающему расчетное значение. В этой связи, очевидно, следует указать на необходимость тщательного анализа достоверности результатов, получаемых для подобных сопел путем численных расчетов в изложенной постановке.

Исследуемое сопло является круглым и визуализация потока в нем с целью детального анализа особенностей картины течения затруднена. Приемом, позволяющим выявить характер распределения параметров потока и исключаяющим возможное влияние фактора дренирования стенок, является определение температуры восстановления и коэффициентов теплообмена по тракту.

Тепловой поток в тракте создавался путем нагрева постоянным электрическим током силой 15–30 А пермаллоевой ленты, наклеенной по контуру сопла, толщина которой составляла 0,03 мм. Хромель-копелевые термопары для измерения температуры располагались в тех же сечениях, что и дренажные отверстия при замерах давления. Горячие спаи термопар были раскатаны до толщины 50 мкм и изолированы от ленты клеевой прослойкой толщиной 50 мкм.

Распределение коэффициентов теплообмена по тракту определено методом обращения теплового потока. Предварительно методика была опробована в экспериментах по анализу теплообмена на пластине, обтекаемой дозвуковым потоком. Сравнение коэффициентов теплообмена для пластины, полученных в опытах, с их значениями, рассчитанными по методике работы [12], показало, что систематическая ошибка составляет +8% (вследствие неточности оценки доли тепла, отводимого в подложку ленты и термопар). При обработке опытных данных по условиям теплообмена в рассматриваемом сопле это значение погрешности было учтено. Изменение температуры восстановления по тракту определено на основе измерений температуры ленты без подогрева ее электрическим током. По исследованию условий теплообмена в сопле проведено более 30 опытов в диапазоне изменения давления торможения 1–3 МПа.

На фиг. 3 точками отмечено распределение температуры восстановления потока, полученное на основе выполненного эксперимента, сплошной линией представлены результаты расчета для случая гладкого течения.

Анализ перечисленных характеристик теплообмена в данном сопле позволяет утверждать, что течение газового потока сопровождается особенностями, обуславливающими резкое изменение значений параметров теплопередачи вблизи горловины. При этом условия теплообмена также указывают на характер течения, подобный предсказанному по результатам измерений статического давления, и на идентичное местоположение особенностей в потоке. Имеет место значительное отличие экспериментальных и расчетных данных, вследствие чего справедливым остается замечание, сделанное при сопоставлении распределения давления.

Результаты данной работы, а также исследования плоских сопел [7] позволяют полагать, что возникновение отрывной зоны в области горловины определяется формой профиля тракта вблизи минимального сечения, т. е. углом конусности входного патрубка и протяженностью цилиндрического участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирумов У. Г. Расчет течения в сопле Лаваля.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1967, № 5, с. 10–22.
2. Back L. H., Cuffel R. F., Massier P. F. Influence of contraction section shape and inlet flow direction supersonic nozzle flow and performance.— J. Spacecraft and Rockets, 1972, v. 9, № 6, p. 420–427. (Рус. перев.: Бэк, Каффел, Массье. Влияние начального направления потока и формы сужающейся части на характеристики сверхзвукового сопла.— Вопр. ракетн. техники, 1973, № 5, с. 19–36).
3. Иванов М. Я., Идиятуллина Ф. Л. К расчету гладких стационарных течений идеального газа методом третьего порядка точности.— Журн. вычисл. матем. и матем. физики, 1978, т. 18, № 4, с. 996–1006.
4. Идиятуллина Ф. Л., Лаврухин Г. Н., Михайлов Б. Н., Тагиров Р. К., Ягудин С. В. Расчетные и экспериментальные исследования влияния радиуса кривизны контура в области критического сечения на характеристики сверхзвуковых сопел.— Уч. зап. ЦАГИ, 1980, т. 11, № 4, с. 159–164.
5. Дворецкий В. М. Исследование влияния формы сопла на характеристики пространственных до- и сверхзвуковых течений.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, № 6, с. 147–151.
6. Бобович А. Б., Корнилович В. Б., Маслов Б. Н., Шишков А. А. Экспериментальное исследование асимметричных сопел Лаваля.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 2, с. 123–128.
7. Денисов И. Н., Мосеев Ю. В., Сивиркин В. Ф., Цыбизов Ю. И. Результаты экспериментального исследования плоских и осесимметричных сопел Лаваля.— В кн.: Газодинамика двигателей летательных аппаратов. Казань, 1980, с. 62–68.
8. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
9. Крайко А. Н. Определение интегральных характеристик сопел при течении в них идеального газа.— Уч. зап. ЦАГИ, 1979, т. 10, № 3, с. 1–11.
10. Тагиров Р. К. Теоретическое исследование течения идеального газа в сужающихся соплах.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1978, № 2, с. 198–202.
11. Шишков А. А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 156 с.
12. Авдусевский В. С., Данилов Ю. И., Кошкин В. К., Кутырин И. Н., Михайлова М. М., Михеев Ю. С., Сергель О. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Оборонгиз, 1960. 389 с.

Москва

Поступила в редакцию
1.IX.1983