

УДК 533.6.011.35:518.5

К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СМЕШАННЫХ ТЕЧЕНИЙ В СОПЛАХ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ВХОДОМ

В. М. ДВОРЕЦКИЙ

(Москва)

Приводятся результаты исследования пространственных смешанных течений невязкого и нетеплопроводного газа в соплах, форма которых отлична от осесимметричной в дозвуковой области. В основу исследования положено численное интегрирование нестационарных уравнений газовой динамики с помощью обобщенной на пространственный случай разностной схемы С. К. Годунова [1, 2].

Численный анализ трансзвуковых течений в пространственных соплах проведен в ограниченном числе опубликованных работ либо с использованием процесса установления [3-6] на основе разностных схем С. К. Годунова и В. Ф. Ноха [7], либо обратным методом [8, 9]. При этом не были отмечены некоторые особенности рассматриваемого класса течений. Целью настоящего исследования является выяснение особенностей пространственной картины течения в соплах различных форм с одной плоскостью симметрии, включая сопла с резким изменением контура в дозвуковой области. Оценивается влияние несимметрии дозвуковой части сопла на его локальные и интегральные характеристики, устанавливается зависимость между величиной геометрической несимметрии у однопараметрического семейства сопел и неравномерностью в распределении газодинамических параметров потока.

1. Рассматривается смешанное течение невязкого и нетеплопроводного газа в пространственном сопле Лаваля, контур которого, образованный линиями пересечения стенок с плоскостью симметрии, может быть либо гладким (фиг. 1, а), либо уступобразным. Оси прямоугольной системы координат x, y, z располагаются так, чтобы координатная плоскость xy совпала с плоскостью симметрии, а плоскость yz — с критическим сечением сопла. Линии пересечения стенок сопла с координатными плоскостями xu и xz определяют его форму и задаются в виде функций $y_+(x), y_-(x), z_+(x)$. Контур стенки сопла в произвольной плоскости $x = \text{const}$ задается уравнением

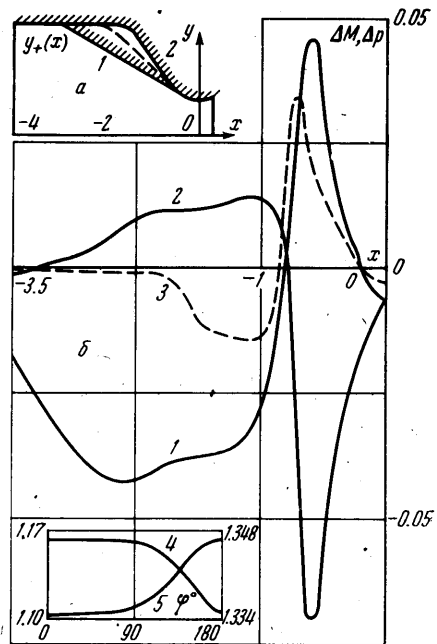
$$(1.1) \quad [y/y_{\pm}(x)]^2 + [z/z_{\pm}(x)]^2 = 1$$

Для каждого сечения сопла $x = \text{const}$ выполняется равенство $y_-(x) = z_+(x)$, т. е. нижняя четверть произвольного сечения образована окружностью. Слева рассматриваемые сопла примыкают к полубесконечной цилиндрической трубе.

Метод расчета и его особенности, связанные с постановкой граничных условий, выбором границ расчетной области и разностной сетки, а также анализ точности вычислений подробно изложены в [6].

2. Контур сопла на фиг. 1, а составлен из плавно сопряженных прямых и дуг окружностей единичного радиуса. Слева при $x = -5$ сопло примыкает к цилиндрической трубе радиуса $r = 3$. Сверхзвуковая часть сопла до $x = 0.4$ образована осесимметричным конусом с углом полураствора 15° . Образующая сужающейся части $y_-(x)$ наклонена к оси сопла под углом 45° . Угол наклона образующей $y_+(x)$ к оси x для сопла 1 равен 30° , для сопла 2 — 55° . Штриховая линия изображает образующую $y_+(x)$ для осесимметричного сопла.

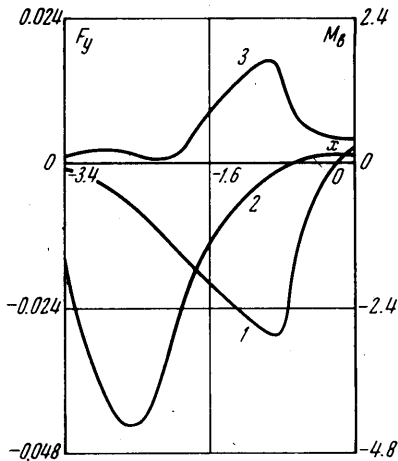
Геометрическая несимметрия дозвуковой части сопла 1 приводит к несимметрии стационарного потока в таком сопле. На фиг. 1, б представлено изменение разности чисел Маха $\Delta M = M_- - M_+$ (линия 1) и давлений $\Delta p = p_- - p_+$ (линия 2) вдоль образующих.



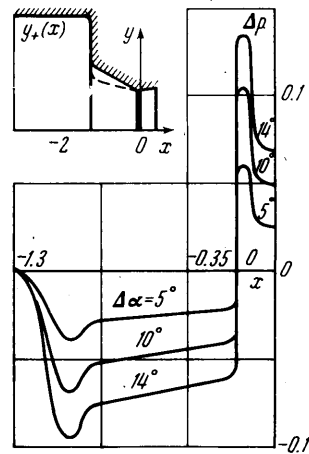
Фиг. 1

Здесь и в дальнейшем индекс минус соответствует параметрам потока на образующей $y_-(x)$, а индекс плюс — параметрам на образующей $y_+(x)$. Неравномерность потока в дозвуковой области носит знакопеременный характер и охватывает область течения, превышающую область геометрической несимметрии, т. е. распространяется на цилиндрическую часть сопла. С ростом скорости потока величина неравномерности нарастает. В области горла наблюдается более быстрый разворот потока у стенки $y_+(x)$, что приводит к изменению знака несимметрии.

Сравнительный анализ неравномерности течения в соплах 1 и 2, для которых разность углов наклона к оси x образующих сужающейся части сопла $\Delta\alpha = \alpha_+ - \alpha_-$ имеет противоположные знаки, показывает, что при произвольном $x = \text{const}$ для рассматриваемых сопел разными являются также знаки величины Δp (линия 3 на



Фиг. 2



Фиг. 3

фиг. 1, б). На начальных участках входа неравномерность потока примерно одинакова для обоих сопел, но дальнейшее развитие несимметрии течения отличается большей неравномерностью для сопла 1.

Распределение давления в сопле 1 для $x = -1.5$ линией 4 (шкала справа) и для $x = -0.5$ линией 5 представлено на фиг. 1, б. Закон распределения давления по стенке отличается от линейного закона и меняется по мере приближения к горлу сопла. Особенности распределения давления по стенке сопла определяют изменение интегральных характеристик: боковой силы F_y , являющейся интегралом сил давления в проекции на ось y , и вращательного момента M_b относительно оси, лежащей в плоскости входного сечения сопла и параллельной оси z . Эти зависимости, представленные для сопла 1 на фиг. 2 линиями 1 и 2 соответственно, определяют несимметрии в распределении поля давления и носят знакопеременный характер. Изменение знака геометрической несимметрии для сопла 2 приводит к изменению знака боковой силы F_y , приведенной на фиг. 2 линией 3.

Сопло более сложной формы изображено на фиг. 3. Цилиндрическая дозвуковая часть сопла имеет радиус $r = 2.8$ и является осесимметричной. Образующая сужающейся части сопла $y_-(x)$ наклонена к оси x под углом $\alpha_- = 13^\circ$. Угол наклона образующей сужающейся части сопла $y_+(x)$ принят переменным и выбирался так, чтобы разность углов $\Delta\alpha$ имела постоянный знак, а ее значения составили 5, 10 и 14° . При $x = -1.25$ в месте соединения цилиндрического и конического участков сопла образуется несимметричный торец, который плавно стыкуется с этими участками при помощи дуг окружностей радиуса $r = 0.3$. Горло сопла при $-0.05 < x < 0$ образовано цилиндром единичного радиуса. Сверхзвуковая часть сопла имеет коническую форму с углом полураствора конуса 15° . В окрестности критического сечения профиль сопла содержит два излома.

Распределение разности давлений вдоль образующих сопла для выбранных значений $\Delta\alpha$, представленное на фиг. 3, позволяет утверждать, что на стенке цилиндрической части сопла неравномерность потока незначительна. Для таких сопел сохраняется знакопеременный характер развития несимметрии течения. Наличие в дозвуковой части сопла уступа обуславливает особенности в изменении интегральных характеристик по длине сопла: наибольшее значение вращающий момент имеет в области уступа, боковая сила достигает наибольшей величины в области горла

сопла. С увеличением разности углов наклона образующих $\Delta\alpha$ к оси x увеличивается Δp , но полностью сохраняется подобие в особенностях развития неравномерности потока: в положении максимумов, в изменении знака параметра, характеризующего неравномерность поля течения.

Изменение Δp вдоль образующих сопла в плоскости симметрии в рассматриваемом диапазоне значения $\Delta\alpha$ указывает на линейную зависимость между величиной геометрической несимметрии у однопараметрического семейства сопел и неравномерностью газодинамических параметров потока. Зависимость изменения боковой силы F_y , действующей на дозвуковую часть сопла, от разности углов $\Delta\alpha$ также близка к линейной. При разности углов наклона образующих сужающейся части сопла к оси x 5, 10 и 14° значение боковой силы составило соответственно 1, 1.92 и 2.72% импульса сопла.

Расчеты выполнены на ЭВМ БЭСМ-6 по программам, составленным на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60. Время счета варианта составило 3–4 час.

Автор благодарит М. Я. Иванова, А. Н. Крайко и Г. Г. Черного за помощь и обсуждение результатов работы.

Поступила 20 II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики. Матем. сб., 1959, т. 47, № 3.
2. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отходящей ударной волной. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6.
3. Иванов М. Я., Рылько О. А. Расчет трансзвукового течения в пространственных соплах. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 5.
4. Иванов М. Я., Рылько О. А. К анализу трансзвукового течения в эллиптических соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 3.
5. Рычков А. Д., Ткаченко А. С. Исследование пространственного дозвукового течения идеального газа в каналах и соплах сложной формы с проницаемыми стенками. В сб. «Материалы 3-й Научной конференции Томского университета по математике и механике», вып. 2. Томск, Томск. ун-т, 1973.
6. Дворецкий В. М., Иванов М. Я. К расчету смешанного течения в соплах с несимметричной дозвуковой частью. Уч. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 5.
7. Нох В. Ф. СЭЛ – совместный эйлерово-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач. В сб. «Вычислительные методы в гидродинамике». М., «Мир», 1967.
8. Пирумов У. Г. Пространственные до- и сверхзвуковые течения в соплах и каналах переменного сечения. Докл. АН СССР, 1972, т. 203, № 1.
9. Пирумов У. Г. Пространственные до- и сверхзвуковые течения в соплах и каналах переменного сечения. ПММ, 1972, т. 36, вып. 2.

УДК 533.6.011.6:532.517.6

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ НА ТЕПЛОБМЕН

А. Н. РУМЫНСКИЙ, М. В. СЕНКЕВИЧ

(Москва)

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния пульсаций потока на турбулентный теплообмен при поперечном направлении распространения звуковых волн. Зарегистрировано существенное увеличение интенсивности теплообмена при среднеквадратичной амплитуде пульсаций давления $p = 168 \div 180$ ∂b и частоте $f = 100 \div 150$ $гц$. Получены зависимости интенсивности теплообмена от характеристик акустического поля.

1. В последнее время опубликован ряд работ, посвященных исследованию влияния пульсаций на теплообмен [1–4]. Однако большинство исследований выполнено