

УДК 533.697.3.011.5

**О ПРОФИЛИРОВАНИИ ПЛОСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ
СВЕРХЗВУКОВЫХ КАНАЛОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ РАЗРЫВНЫЕ
ПАРАМЕТРЫ НА ВЫХОДЕ И ВЫРАВНИВАНИЕ ПОТОКА**

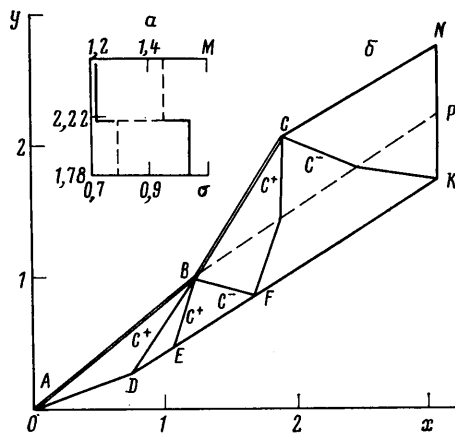
**ВОЙНОВСКИЙ А. С., КИРЕЕВ В. И., МИНИН С. Н.,
ПИРУМОВ У. Г., СМИРНОВ С. С.**

Численное профилирование сверхзвуковых каналов, реализующих заданные изотропические неравномерные параметры в выходном сечении, выполнено в работах [1-3]. Постановка задачи профилирования моделирующих каналов, обеспечивающих непрерывный изотропический поток на выходе при постоянной энтропии на входе S_1 , дана в [1].

В статье построены два класса сверхзвуковых каналов, один из которых реализует на выходе заданные разрывные распределения энтропии и давления p или угла наклона θ вектора скорости w к оси x , а другой преобразует поток с разрывными распределениями газодинамических параметров в поток, однородный по p и θ . Предложены схемы профилирования этих классов каналов и приведены результаты их расчетов, выполненных классическим методом характеристик и его послойными модификациями.

1. В данном разделе статьи в отличие от [1] решена обратная задача построения плоского или осесимметричного канала с центральным телом, обеспечивающего разрывное распределение энтропии S_2 на выходе при непрерывных распределениях давления p и угла θ наклона вектора скорости w к оси x на выходе и вдоль профилируемых стенок.

Кратко сформулируем краевые условия и опишем схему расчета канала (фиг. 1). Рассматривается верхняя половина плоскости течения в декартовой (цилиндрической) системе координат (x, y) . Течение на входе в искомый канал принимается заданным и в частном случае однородным с числом Маха M° . Задание граничных условий по p или θ и энтропийной функции $\sigma = p/\rho^*$ (ρ — плотность, κ — показатель адиабаты) вдоль поперечно ориентированной, заранее не фиксированной границы NK , являющейся выходным сечением канала, осуществляется в виде зависимости от функции тока ψ . Условия по p или θ на продольно ориентированной также не фиксированной границе (центральном теле FK) задаются в виде функций координат x, y . Функция σ на границе NK в рассматриваемом случае задается в виде ступеньки с разрывом в точке P со значением $\psi = 0,5$ (ψ — нормирована так, что $\psi = 0$ в точке K и $\psi = 1$ в точке N). Приращение $\Delta\sigma = \sigma^+ - \sigma^- > 0$ (σ^+, σ^- — предельные значения σ сверху и снизу от точки разрыва соответственно).



Фиг. 1

Распределение функции σ снизу от точки P обеспечивается участком AB головной ударной волны ABC . Значение функции $\sigma = \sigma^- = 0,79$, принятой в статье постоянной, реализуется на клине с углом полураствора 21° . Заданный разрыв $\Delta\sigma$ создается с помощью излома в точке B волны ABC , который осуществляется на основе применения конфигурации со взаимодействием ударной волны AB и веера волн сжатия DBE (характеристики \mathcal{C}^+), центрированного в точке B . Положение последней выбирается таким образом, чтобы значение ψ в ней было равно ψ в точке P . Изменения функции σ за счет других ударных волн в расчетной схеме исключаются. Это обуславливает необходимость использовать для обеспечения заданного распределения σ конфигурацию с отраженным в точке B центрированным веером разрежения.

Схема профилирования канала при описанных граничных условиях основана на решении обратной задачи, включающей характерные задачи газовой динамики: задачи Коши в областях ABE и BFC , задачу Гурса в области BEF и две смешанные краевые задачи в областях CFK и CKN [4–6]. Вначале по заданному перепаду $\sigma(\psi)$ вдоль ударной волны ABC рассчитываются данные Коши за ней. При этом параметры в точке B определяются отдельно от остального участка волны по программе расчета конфигурации с взаимодействием ударной волны и веера сжатия. В работе проведено численное параметрическое исследование конфигурации и в широком диапазоне M° ($1,2 \leq M^\circ \leq 10$) выявлены области ее существования с отраженным веером разрежения и ударной волной. Затем классическим методом характеристик решаются задачи Коши, задача Гурса и смешанная задача в области CKF . Для расчета смешанной области CKN используется сеточно-характеристический метод по слоям $\psi = \text{const}$ [4–6].

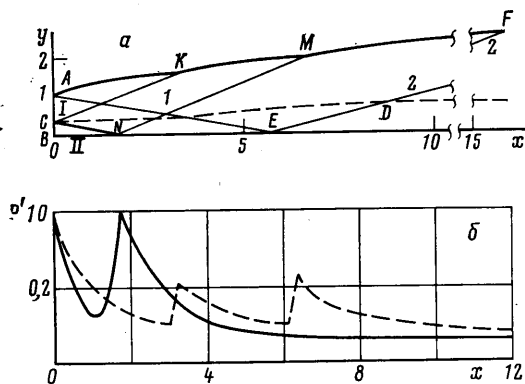
В результате расчета при $M^\circ = 3$ и постоянном значении $\theta = 32^\circ$ вдоль границы FK получен плоский канал с центральным телом AK и обечайкой CN , реализующий разрывный профиль функции σ (штриховая линия на фиг. 1, *a*) и отклонение потока на 32° . Сплошной линией на фиг. 1, *a* показан профиль функции M на выходе, BP на фиг. 1, *b* – контактный разрыв. Интенсивность веера волн сжатия DBE , характеризуемая отношением μ^+/μ^- (μ^- – угол Маха), равна 0,74. Веер DBE отклоняет поток на 14° . Изломом ударной волны ABC , составляющим величину 18° , обеспечивается такое же отклонение потока, что обусловлено нулевой интенсивностью отраженного веера разрежения (характеристика BF).

2. При решении задач о смешении струй необходимо на малых длинах осуществлять перемешивание двух или большего числа сверхзвуковых неоднородных потоков, обеспечивая высокую степень однородности всех газодинамических параметров. Большая длина перемешивания снижает эффективность широко распространенного способа взаимодействия параллельных сверхзвуковых струй и обуславливает необходимость использования для этой цели струй, направленных под углом друг к другу. Однако при реализации такой схемы в смешивающемся сверхзвуковом потоке возникают существенные неоднородности, образующиеся из-за возникающих при соударении струй сильных разрывов – ударных волн, контактных границ, центрированных волн разрежения. Это обстоятельство ограничивает возможность практического применения указанного способа взаимодействия.

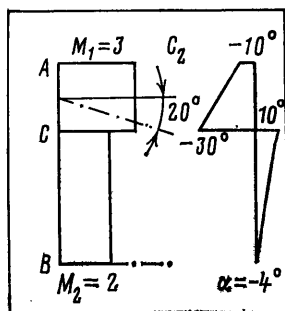
В данном разделе статьи предлагается иная схема выравнивания параметров взаимодействующих потоков внутри переходного канала минимальной длины, реализующего на выходе однородный по p и θ поток. Профилирование канала осуществляется в идеальной постановке при решении обратной задачи двумя сеточными модификациями метода характеристик по слоям $x = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$ [4–6]. В обоих методах используются одни и те же характеристические уравнения с искомыми функциями x, y, p, θ [7].

Обратная задача заключается в следующем. Пусть в декартовой (цилиндрической) системе координат (x, y) в некотором сечении AB , являю-

щимся, например, выходным из решетки профилей, заданы два плоских симметричных относительно оси x или осесимметричных сверхзвуковых потока I и II, взаимодействующих в точке C (фиг. 2, a). Пусть эти потоки в указанном сечении характеризуются различными газодинамическими параметрами: показателями κ_1, κ_2 , распределениями давлений $p_1(y), p_2(y)$, углов наклона $\theta_1(y), \theta_2(y)$, скоростей $w_1(y), w_2(y)$ (или чисел $M_1(y), M_2(y)$) и плотностей $\rho_1(y), \rho_2(y)$ при (в общем случае) переменных разрывных распределениях S и полной энтальпии H° . Здесь и в последующем



Фиг. 2



Фиг. 3

тексте нижние индексы 1 и 2, указываемые в обозначениях параметров, относятся к областям I, II, в которых распространяются потоки I и II. Для обеспечения разгона потока в профилируемом канале в точке A задается положительное приращение угла θ .

На величины газодинамических параметров вдоль AB накладывается условие, заключающееся в том, что их значения в точке взаимодействия C не достигают критических, при которых реализуется переход к дозвуковому течению. Кроме того, полагаем, что интенсивность ударных волн, образующихся в точке C , не слишком велика, а величины H_1° и H_2° одинаковы. Ограничение на интенсивность ударных волн обусловлено возможностью осуществления их сквозного счета послышными модификациями метода характеристик и получением достаточной для практики точности численных результатов.

При отмеченных исходных данных и физических предположениях требуется построить профиль переходного канала минимальной длины AF , который обеспечивает на выходе постоянное распределение углов $\theta_1(y) = \theta_2(y) = 0$ и, следовательно, давления $p_1(y) = p_2(y) = p^1$ (p^1 — значение p в точке пересечения характеристики AE , ограничивающей область влияния данных на AB , с осью x).

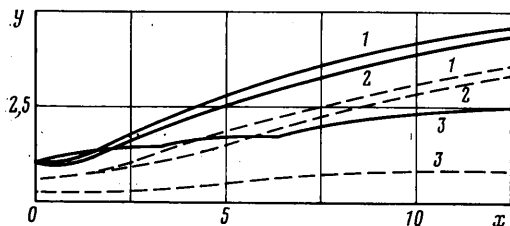
Схема профилирования выравнивающего канала состоит в следующем. Вначале по формулам взаимодействия двух сверхзвуковых потоков, приведенных, например, в [8], рассчитывается точка C контактного разрыва CD (фиг. 2, a). Затем по данным Коши на AB методом характеристик по слоям $x = \text{const}$ рассчитывается их область влияния ABE и методом характеристик по слоям $\psi = \text{const}$ решается задача Гурса в области AEF .

Некоторые возможности разработанного подхода к проблеме выравнивания основных неоднородностей во взаимодействующих потоках проиллюстрированы на фиг. 2–5. В исследованиях, проведенных для трех схем взаимодействия, обозначенных C_1, C_2, C_3 , газ в потоках I и II принимается с одинаковым $\kappa = 1,4$. При выбранных условиях течения свойства потоков удобно характеризовать распределениями чисел M (либо давления p) и углов θ .

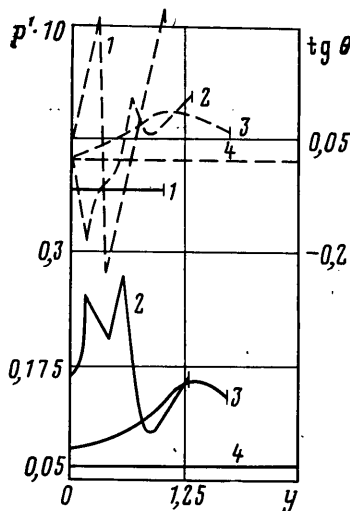
Профили чисел M для потоков I и II принимаются однородными и равными $M_1 = 3$ и $M_2 = 2$ для схем C_1 и C_2 (фиг. 3) и $M_1 = M_2 = 3$ для C_3 . Угол наклона кас-

тельной к стенке профилируемого канала в точке A обозначен символом α . Величины h_1, h_2 характеризуют ширину потоков I, II в сечении AB . Для схем C_1 и C_2 принято $h_1=1/3, h_2=2/3$, а для $C_3 h_1=2/3, h_2=1/3$. Угол наклона θ потоков I и II для схемы C_1 принимается нулевым, а $\alpha=9^\circ$. Для C_2 и C_3 распределения $\theta_1(y)$ и $\theta_2(y)$ выбраны линейными, причем в точке C для $C_3 \theta_1=-18^\circ$ и $\theta_2=18^\circ$, а углы α соответственно равны $-4^\circ, 18^\circ$. Величины последних выбирались в процессе серии расчетов такими, чтобы во всех трех схемах взаимодействия в потоке E реализовались значения $M^1=4,17$. Для C_1 и C_3 центральные оси потоков параллельны, а для C_2 ось потока I наклонена в сторону потока II под углом 20° (штрихпунктирная линия на фиг. 3).

На фиг. 4 приведены контуры выравнивающих каналов (сплошные линии) для C_1, C_2, C_3 , обозначенных цифрами 1, 2, 3 соответственно, а также контактные границы (штриховые линии).



Фиг. 4



Фиг. 5

Сверхзвуковым течениям внутри всех спрофилированных каналов присущ ряд одинаковых свойств. В точке C взаимодействия встречающихся потоков реализуются контактная граница и две ударные волны, одна из которых CK направлена от оси x , а другая CN — к оси x . Ударная волна CK , а также NM , образующаяся в результате взаимодействия ударной волны CN с симметрично расположенной снизу от оси x , в точках K и M соответственно достигают верхней линии тока AF , принимаемой в качестве стенки канала. В этих точках стенка претерпевает излом, равный углу отклонения потока. На ударных волнах поток внутри выравнивающего канала в местах отсутствия ударных волн с возрастанием x расширится.

Из фиг. 4 видно, что продольные и поперечные размеры каналов и контактных границ для схем C_1 и C_2 получаются достаточно близкими. Это свидетельствует о сравнительно слабом влиянии неравномерностей по углам встречи и определяющим влиянии на указанные геометрические характеристики профилей чисел M . Ударные волны NM и CK для обоих каналов 1 и 2 в точках их встречи со стенкой являются весьма слабыми. Это обусловлено тем, что течение на начальном участке в обоих потоках в местах отсутствия ударных волн весьма интенсивно расширяется в области ABE влияния данных на AB , в которой содержится веер волн разрежения, созданный угловой точкой A .

Дадим анализ результатов профилирования канала 3 (фиг. 2, 5), построенного для схемы C_3 с одинаковыми профилями чисел M и существенной неоднородностью по наклону w . В точке C образуются ударные волны CK и CN примерно одинаковой интенсивности и близкие к прямолинейным. Характеристика, ограничивающая область влияния данных на AB , обозначенная цифрой 1 на фиг. 2, а, является достаточно искривленной. Выходная характеристика, близкая к прямолинейной, обозначена цифрой 2 ($M^1=4,17$). Из фиг. 2, а видно, что в точках K и M стенка канала претерпевает заметный излом. На фиг. 2, б приведены зависимости безразмерных давлений $p' = p / \rho_* w_*^2$ (знак * относится к критическим параметрам) вдоль оси x (сплошные линии) и вдоль стенки канала (штриховые линии). Из поведения кривой вдоль оси видно, что поток II на участке BN интенсивно расширяется. В точке N реализуется торможение потока на ударной волне. Здесь имеет место резкое возрастание давления. Вниз по потоку от точки N осуществляется монотонное расширение потока до значения $M^1=4,17$. Вдоль стенки канала AF на начальном участке, так же как и вдоль оси, поток расширяется. В точках K и M , где стенка пересекается с ударными волнами CK и NM , наблюдается скачкообразное возрастание давления. На участках KM и MF поток расширяется.

Из поведения $p(x)$ вдоль стенки видно, что эффект существенного ослабления ударных волн NM и CK , отмеченный применительно к схемам C_1 и C_2 , для схемы C_3 отсутствует. Это обстоятельство обусловлено тем, что в точке A здесь нет разрыва угла θ .

На фиг. 5 показаны профили p и $\operatorname{tg} \theta$ сплошной и штриховой линиями соответственно в сечениях x , равных 0; 1,4; 5; 19 (линии 1-4). Видно, что реализация высокой степени неоднородности по углу θ в начальном сечении приводит к значительной неравномерности внутри канала и по остальным газодинамическим параметрам. Неравномерности по давлению и по углу θ в сечении $x=5$ меньше соответствующих неравномерностей при $x=1,4$ и далее вниз по потоку монотонно уменьшаются. Таким образом, построены переходные каналы, преобразующие взаимодействующие потоки газов с $\kappa_1=\kappa_2$ в поток однородный на выходе по p и θ .

Отметим, что предложенная схема профилирования выравнивающих каналов может найти широкое применение при разработке сопловых решеток, сверхзвуковых диффузоров, а также при решении задач, содержащих слоистые течения.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность А. Н. Крайко за полезные обсуждения при подготовке материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крайко А. Н., Шеломовский В. В. О профилировании плоских и осесимметричных сопел и каналов, реализующих заданный сверхзвуковой поток в сечении выхода. — Изв. АН СССР, МЖГ, 1981, № 4, с. 94–102.
2. Киреев В. И. О моделировании газовых струй, истекающих из реальных сопел Лаваля. — Уч. зап. ЦАГИ, 1976, т. 7, № 2, с. 143–148.
3. Киреев В. И., Пирумов У. Г. О профилировании сопел модельных систем. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 2, с. 187–189.
4. Киреев В. И. Разностные методы решения обратной задачи профилирования сверхзвуковых сопел. М., 1980. 21 с. ВИНТИ, 1980, деп. рук. № 3302.
5. Киреев В. И., Войновский А. С. Решение обратной задачи профилирования новых классов сверхзвуковых сопел и каналов сеточно-характеристическим методом и методом С. К. Годунова. — В кн.: Числ. методы механики сплошной среды. Новосибирск, 1982, т. 13, № 3, с. 46–62.
6. Войновский А. С., Киреев В. И. О смешанных краевых задачах профилирования сверхзвуковых сопел и каналов. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1983, № 4, с. 112–118.
7. Кацкова О. Н., Крайко А. Н. Расчет плоских и осесимметричных сверхзвуковых течений при наличии необратимых процессов. М., 1964. 44 с.
8. Иванов М. Я., Крайко А. Н., Михайлов Н. В. Метод сквозного счета для двумерных и пространственных сверхзвуковых течений. — Журн. вычисл. матем. и матем. физ., 1972, т. 12, № 2, с. 441–463.

Москва

Поступила в редакцию
1.VI.1983