

В заключение заметим, что так же может быть рассмотрена задача о совместном движении двух ударных слоев [2, 6], разделенных контактной поверхностью. Выводы о влиянии неадиабатичности течения будут аналогичны.

Автор благодарит А. К. Реброва за обсуждение результатов работы.

Поступила 23 IX 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный Г. Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М., Физматгиз, 1959.
2. Зак Л. И. Гиперзвуковая струя, истекающая в покоящуюся среду или в слутный сверхзвуковой поток. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
4. Бай Ши-и. Введение в теорию течения сжимаемой жидкости. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
5. Ба Хань-линь, Лунькин Ю. П. О колебательной релаксации за ударной волной. Ж. техн. физ., 1963, т. 33, вып. 2.
6. Чекмарев С. Ф. Неустановившееся радиальное расширение газа в затопленное пространство от внезапно включенного стационарного источника. ПМТФ, 1975, № 2.

УДК 533.6.011.5

К АНАЛИЗУ НЕКОТОРЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛ

А. И. РЫЛОВ

(Новосибирск)

Ранее в [1] были построены сверхзвуковые несимметричные плоские сопла, которые характеризуются в основном центрированными волнами сжатия и разрежения. В ряде случаев интенсивная волна сжатия нежелательна, например, из-за возможности отрыва пограничного слоя на стенках сопла. Поэтому в постановку задачи необходимо включать некоторые ограничения на градиент давления, например условие невозрастания давления на стенках сопла. Наличие последнего условия отличает результаты [1] лишь тем, что центрированные волны сжатия в соплах заменяются участками постоянных параметров. Ниже при одинаковых условиях рассматриваются несимметричные сопла с волнами сжатия, с участками постоянных параметров, а также для сравнения известные сопла с прямой нижней стенкой.

Исследуются некоторые параметры трех сверхзвуковых несимметричных плоских сопел. У этих сопел потоки на входе и выходе равномерные и горизонтальные с числами Маха M_1 и M_2 ($1 < M_1 < M_2$) соответственно. Ординаты начальной и конечной точек нижних контуров лежат на оси x , т. е. $y_a = y_b = 0$ (фигура). Течение в соплах изэнтропическое, газ совершенный с показателем адиабаты κ . Характеристика $a^{\circ}b$ второго семейства, соответствующая развороту потока в точке a° , приходит в концевую точку нижнего контура. В силу этого в областях, примыкающих к входным и выходным потокам реализуются течения типа простых волн, а в $a^{\circ}cd$ параметры постоянны и определяются из

$$(1) \quad \theta_c = 1/2(h(M_2) - h(M_1)), \quad h(M_c) = 1/2(h(M_2) + h(M_1))$$

Здесь θ – угол наклона вектора скорости

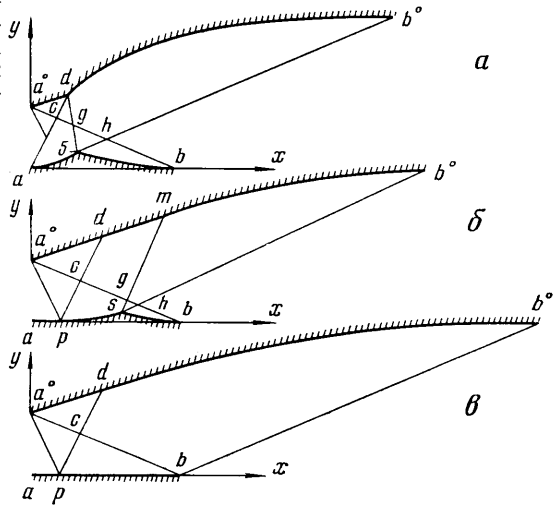
$$h(M) \equiv \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \arctg \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}} (M^2-1) - \arctg \sqrt{M^2-1}$$

Сопло I (фигура, a) характеризуется центрированными волнами сжатия cdg и разрежения $dghb^{\circ}$. Как было показано в [1], это сопло – одно из возможных решений задачи о профилировании сопла наименьшей длины при наличии приведенных

выше ограничений. Центрированные волны cdg и $dgshb^\circ$ соответствуют крайним экстремумам, обусловленным недопустимостью из-за условия изэнтропичности течения пересечения одноименных характеристик внутри сопла. Если добавить условие о невозрастании давления вдоль контуров, то это условие даст новый крайовой экстремум — участок постоянного давления, а сопло 1 перейдет в сопло 2 (фигура, б), характеризующееся треугольником $a^\circ d m p c$ постоянных параметров, определяемых соотношениями (1). Здесь ap — прямая, ps — линия тока в простой центрированной волне разрежения. Заметим также, что сопла 1 и 2 можно трактовать и как верхние половинки симметричных сопел с замкнутыми центральными телами.

Наконец, сопло 3 — верхняя половина известного симметричного оптимального сопла [2-5]. Это симметричное сопло самое короткое среди сопел с заданными горизонтальными потоками на входе и выходе. Отметим, что в [6] укороченные сопла 3 рассматривались как возможные сопла гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей.

Описанные выше сопла были просчитаны по методу характеристик. На начальной характеристике бралось 170 точек, интегралы сил давления считались с помощью формулы Симпсона. Все это обеспечило большую точность



расчетов. Ниже приведены длины l_1, l_2, l_3 сопел 1, 2, 3 и длины нижних контуров m_1, m_2, m_3 для различных величин M_1, M_2, κ .

κ	M_1	M_2	l_1	l_2	l_3	m_1	m_2	m_3
1.12	1.435	3.183	33.04	34.78	43.24	8.43	9.91	10.90
1.4	1.435	3.701	26.32	27.88	34.25	7.12	8.04	8.57
1.12	3	4.683	108.9	113.7	139.9	22.42	28.45	32.13
1.4	3	6.258	93.75	98.08	118.6	19.46	23.32	25.57
1.12	3	4.949	190.7	196.2	240.7	30.86	41.97	50.39
1.4	3	6.962	165.1	170.1	204.3	26.55	33.65	38.90

Видно, что сопла 1 и 2 короче сопел 3 на 18—23%, при этом сопла 1 лишь не намного короче сопел 2.

Более подробно остановимся на анализе тяговых характеристик. Как обычно, под тягой сопла понимаем горизонтальную проекцию суммы интегралов сил давления по обоим контурам. Очевидно, что при одних и тех же M_1, M_2, κ тяги полных, неукороченных сопел 1, 2, 3 равны между собой. Под укороченным соплом будем понимать сопло с укороченным верхним контуром. Такое укорочение не нарушает течение вблизи нижнего контура. Обозначим тяги сопел 1, 2, 3, укороченных на длину l , через

$$X_1, X_2, X_3 \quad (X_i \equiv X_i(M_1, M_2, \kappa, l), \quad i=1, 2, 3).$$

Зафиксируем M_1, κ, l . Тогда можно выбрать такое M_2 или θ_c , что сопло 3, укороченное на эту длину, реализует наибольшую для данной длины тягу среди всех сопел с теми же M_1 и κ [2-5], а не только среди сопел с горизонтальной нижней стенкой. Параметры M_2 , или θ_c , определяются тем, что в точке укорочения должно выполняться условие Буземана [2-5]

$$f(M, \theta) \equiv \frac{p-p_h}{\rho w^2} \sqrt{M^2-1} - \sin \theta \cos \theta = 0$$

где p — давление, p_h — внешнее давление, ρ — плотность, w — модуль вектора скорости.

Далее l и M_2 (или θ_c) выбраны так, что они удовлетворяют этому условию. Ниже для случая нулевого внешнего давления ($p_h=0$) приведены значения $\kappa, M_1, \theta_c, l, X_1$,

X_2 , X_3 , k_1 , k_2 , где $k_i = ((X_i - X_3)/X_3) \cdot 100\%$. Значения X_1 , X_2 , X_3 отнесены к величине $p_1 h_1 s_1$, где p_1 — давление на входе в сопло, h_1 — его входное сечение, s_1 — его ширина, θ_c дано в градусах. Вообще говоря, X_1 и X_2 достигают в отличие от X_3 своего максимума для данного l при некотором другом θ_c , но различие это, как показали расчеты, очень мало.

x	M_1	θ_c	l	X_1	X_2	X_3	k_1	k_2
1.12	1.435	33.216	10	1.118	1.044	1.022	9.4	2.2
1.4	1.435	25.806	10	0.822	0.783	0.762	8	2.7
1.12	3	24.779	40	2.023	1.954	1.899	6.4	2.9
1.4	3	18.458	40	1.372	1.344	1.311	4.6	2.5
1.12	3	27.890	70	2.306	2.266	2.199	4.8	3
1.4	3	20.509	70	1.505	1.491	1.459	3.1	2.2

Из приведенных данных видно, что k_1 существенно зависит от l и меняется в пределах 3–9%. Как и следовало ожидать, $k_1 > k_2$, но это различие относительно невелико при больших l .

Проведенное сравнение показало, что сопла 1 и 2 по некоторым геометрическим и тяговым параметрам имеют выигрыш по сравнению с оптимальными соплами с горизонтальной нижней стенкой (сопла 3). Выигрыш сопла 1 несколько больший, чем сопла 2. Однако в тех случаях, когда волна сжатия в сопле нежелательна, например, из-за возможности отрыва пограничного слоя, сопло 2, не имеющее волн сжатия, оказывается предпочтительнее. Может представить интерес также и некоторое промежуточное между соплами 1 и 2 сопло с докритическим, не вызывающим отрыв пограничного слоя сжатием.

Автор благодарен А. Н. Крайко за интерес и внимание к работе и полезные обсуждения.

Институт теоретической и прикладной механики СО АН СССР

Поступила 18 VI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Рылов А. И. Решение вариационной задачи о профилировании сопла, реализующего равномерный сверхзвуковой поток. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 4.
2. Guderley K. G., Hantsch E. Beste Formen für achsensymmetrische Überschallschubdüsen, Z. Flugwissenschaft., 1955, Bd 3, Nr 9. (Рус. перев.: Наилучшие формы сверхзвуковых осесимметричных реактивных сопел. Механика, Сб. перев. иностр. период. лит., 1956, № 4.)
3. Шмыглевский Ю. Д. Некоторые вариационные задачи газовой динамики. Тр. ВЦ АН СССР, 1963.
4. Крайко А. Н. Вариационные задачи сверхзвуковых течений газа с произвольными термодинамическими свойствами. Тр. ВЦ АН СССР, 1963.
5. Гонор А. Л., Крайко А. Н. Некоторые результаты исследования оптимальных форм при сверх- и гиперзвуковых скоростях. В кн. «Теория оптимальных аэродинамических форм». М., «Мир», 1969.
6. Заголова В. В., Зудов В. Н., Шумский В. В. Расчетный анализ плоских несимметричных сопел при сверхзвуковой скорости на входе. Изв. СО АН СССР. Сер. техн. н., 1972, № 13, вып. 3.

УДК 533.6.011.5 : 541.12

ЛИНЕАРИЗОВАННОЕ НЕРАВНОВЕСНОЕ ТЕЧЕНИЕ ГОРЮЧЕЙ СМЕСИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

М. М. ГИЛИНСКИЙ

(Москва)

Пусть сверхзвуковой поток предварительно перемешанной горючей смеси газов встречает газовый поток под некоторым углом θ . Такая ситуация может возникнуть при искусственном тангенциальном вдуве струи через боковую поверхность летательного аппарата, при распределенном сверхзвуковом вдуве горючей смеси под малым углом к поверхности, при горении за хвостовым скачком на задней кромке тонкого профиля и т. д.