

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Б. Британ, Е. И. Васильев, Особенности формирования течения в профилированном сопле ударной трубы, *Докл. АН СССР*, 1985, том 281, номер 2, 295–299

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.83

16 января 2025 г., 22:32:26



А.Б. БРИТАН, Е.И. ВАСИЛЬЕВ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ В ПРОФИЛИРОВАННОМ СОПЛЕ УДАРНОЙ ТРУБЫ

(Представлено академиком Г.И. Петровым 29 XII 1983)

Процесс формирования течения в соплах импульсных установок — это сложное пространственное течение с ударными волнами, зонами отрыва и нестационарного расширения, которое до сих пор не поддается общему аналитическому исследованию. Отдельные детали процесса наиболее полно изучены в ударных трубах с отражающими соплами, в которых параметры на входе формируются ударной волной, отраженной от торцевой стенки трубы [1]. В таких экспериментах наиболее важными являются три вопроса:

- 1) Как формируется течение за ударной волной, отраженной от стенки с отверстием?
- 2) Сколько времени занимает процесс формирования стационарного сверхзвукового потока?
- 3) Как зависит этот процесс от конкретной геометрии сопла и режима эксперимента?

К настоящему времени известны результаты расчетов [2, 3], в которых рассматривались качественные детали течения в окрестности входной части сопла и экспериментальные данные [4], показывающие, что уменьшение радиуса скругления дозвуковой части приводит к ослаблению ударной волны, осуществляющей запуск сопла.

Процесс формирования сверхзвукового потока исследован теоретически [2, 3, 5, 6–8, 10] и экспериментально [1, 4, 7]. Можно считать установленным, что используемая в большинстве случаев упрощенная модель запуска [7] удовлетворительно описывает основные детали течения в соплах с углом раствора $\alpha < 40^\circ$ и режимом истечения, близким к расчетному [1, 3, 6–8]. С увеличением угла α начинает сказываться неоднородность параметров по сечению, которая особенно характерна для разгонного участка профилированных сопел с большой скоростью расширения вблизи критического сечения [10].

В данной работе рассматривается запуск профилированного сопла ударной трубы большого диаметра $D = 500$ мм [5]. Сопло с геометрической степенью расширения $\epsilon = 16$ и высотой минимального сечения $h^* = 4,34$ мм имело развитую дозвуковую часть длиной 44 мм. Сверхзвуковая часть длиной 140 мм спрофилирована для получения равномерного потока в выходном сечении с числом Маха $M = 4$.

В расчетном исследовании течение считалось плоским, так как максимальная высота входной части сопла равна $0,15D$. Принималось, что ось x декартовых координат xu направлена слева направо вдоль сопла и лежит в плоскости симметрии течения, а плоскость $x = 0$ расположена в минимальном сечении. Запуск осуществляется ударной волной (УВ), проходящей в сечение $x = 0$ в момент времени $t = 0$. При $t < 0$ газ в сверхзвуковой части сопла покоится и однороден.

При взаимодействии падающей УВ с торцевой стенкой возникает сложная волновая картина, в частности, образуется отраженная УВ, которая движется справа

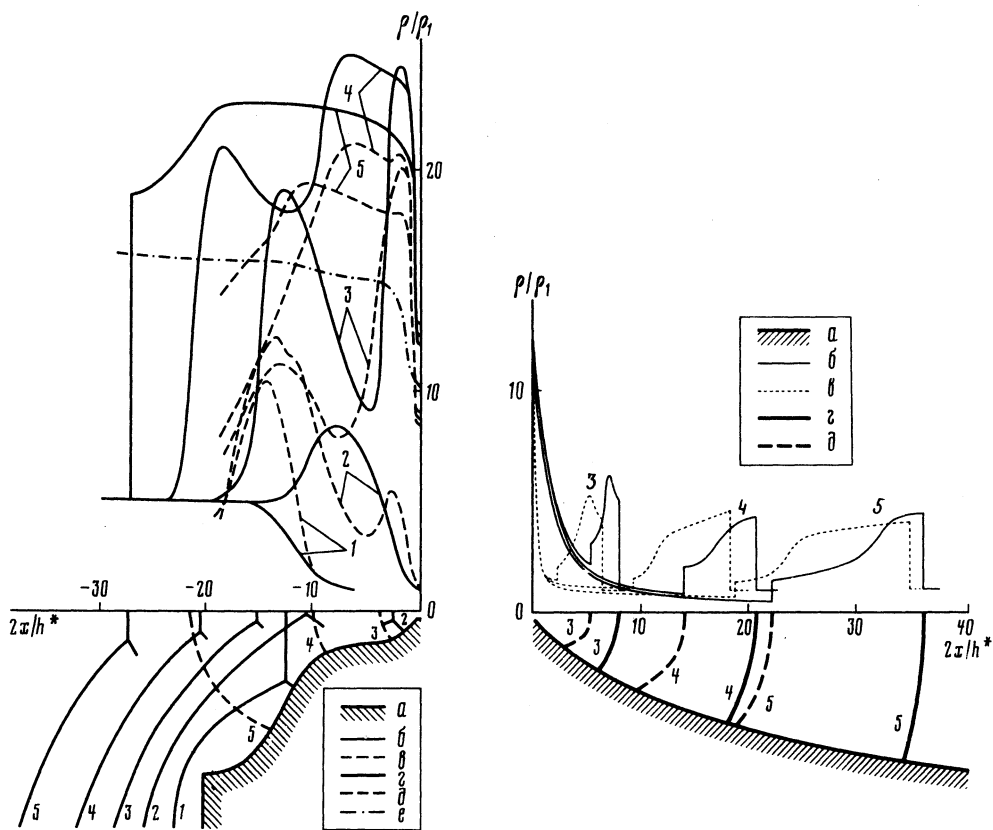


Рис. 1. Распределение плотности и конфигурации ударных волн в дозвуковой части сопла для моментов времени: $-2,05$; $-0,35$; $1,5$; $4,3$; $8,06$, обозначенных цифрами 1–5 соответственно. a – контур сопла; b – плотность на оси; c – плотность на стенке; d – фронты падающей и отраженной УВ; e – фронт волны торможения; e – стационарное распределение плотности на оси; $M_s = 5$

Рис. 2. Распределение плотности и конфигурация ударных волн в сверхзвуковой части сопла для моментов времени: $1,5$; $4,3$; $8,06$, обозначенных цифрами 3–5 соответственно. a – контур сопла; b – плотность на оси; c – плотность на стенке; d – фронт первичной УВ; e – фронт вторичной УВ; $M_s = 5$

налево, и проходящая УВ, которая распространяется по соплу [2, 3]. Численное интегрирование двумерных нестационарных уравнений, описывающих течение невязкого и нетеплопроводного совершенного газа (показатель адиабаты $\gamma = 1,4$), осуществлялось методом Годунова [2] в области между отраженной и проходящей УВ, которые служили подвижными границами расчетной области и выделялись в процессе счета наряду с вторичной волной сжатия, возникающей в сверхзвуковой части сопла. Параметры газа перед отраженной УВ определяются числом Маха M_s падающей УВ в трубе и начальными условиями. Отношение диаметра трубы к высоте критического сечения в расчетах принималось равным 100. Обезразмеривание системы уравнений производилось по плотности ρ_1 , скорости звука a_1 невозмущенного газа и полувысоте минимального сечения $h^*/2$. Исследовался процесс формирования течения за отраженной УВ в дозвуковой части и запуск сверхзвуковой части сопла. Подобный анализ в одномерной постановке проводился ранее в [3] для сопла с прямолинейными образующими и углом раствора $\alpha = 30^\circ$. В работе [2]

двумерные расчеты без выделения УВ использовались для исследования течения в до- и трансзвуковой области сопла, критическое сечение которого совпадало с плоскостью отражающего торца.

Картину развития течения за УВ, отраженной от торцевой стенки, в которую вмонтировано сверхзвуковое сопло, иллюстрирует рис. 1. Видно, что входная часть сопла нарушает нормальный характер отражения падающей УВ. Центральная область фронта падающей волны, двигаясь по сходящемуся каналу, взаимодействует с его стенками и к моменту времени 1 плотность газа на стенке возрастает (здесь и далее по тексту цифры 1–5 соответствуют моментам времени, указанным на рис. 1). Возмущения от стенки еще не сказываются на оси трубы, и результирующая волновая конфигурация складывается: из центрального участка падающей УВ, неискаженного взаимодействием; участка УВ, отраженной от плоской части торца; и маховской конфигурации, появившейся в результате взаимодействия указанных фронтов со стенками канала. К моменту времени 2 эта конфигурация достигает плоскости симметрии, падающая волна усиливается, а отраженная УВ перекрывает весь канал и движется навстречу потоку газа. Распределение плотности к этому моменту времени показывает, что около критического сечения формируется область с повышенными параметрами на стенке, обусловленная дополнительным сужением канала перед минимальным сечением. К моменту времени 3 отраженная УВ взаимодействует с осью трубы и плотность за ее фронтом на оси возрастает. В момент прохождения минимального сечения параметры газа за проходящей УВ значительно превышают стационарные критические значения и происходит "запирание" сопла. Образуется волна торможения, которая резко повышает плотность и давление газа на входе в минимальное сечение. Размеры области с повышенными параметрами увеличиваются со временем, так как волна торможения движется навстречу потоку по дозвуковой части сопла. Из рис. 1 видно, что к моменту времени 4 эта область занимает почти половину дозвуковой части сопла. Значения параметров уменьшаются, стремясь к стационарным (штрих-пунктирная кривая на рис. 1) значительно позже, когда волна торможения выходит из дозвуковой части сопла в объем трубы (кривые 5).

Формирование сверхзвукового потока (рис. 2) происходит в условиях существенной неоднородности течения на разгонном участке. Фронты УВ, особенно вторичной, значительно искривлены. Такая геометрия течения диктуется большим начальным углом раствора сопла $\alpha = 90^\circ$ и переразгоном потока вблизи стенки [10]. Вторичный скачок у стенки формируется раньше и имеет большую интенсивность, чем на оси. В результате центральная часть вторичной УВ сносится вниз по потоку быстрее пристеночной и фронт принимает изогнутую форму. Кривизна скачков уменьшается по мере приближения к участку с параллельными стенками (момент времени 5 на рис. 2).

Приведенные результаты позволяют проанализировать влияние геометрии отражающего сопла на формирование стационарной картины течения. На рис. 3 цифрами 4 и 5 обозначены отношения скоростей V_1/V'_1 и V_2/V'_2 , где V_1 и V_2 — скорости вытеснения первичной и вторичной УВ из сопла. Штрихом помечены скорости, рассчитанные при стационарных значениях параметров в критическом сечении во все время движения. Влияние входной части приводит к тому, что уже в критическом сечении и в процессе всего запуска величина V_1 остается на 10–15% выше, чем V'_1 . Установление в минимальном сечении стационарных параметров довольно быстро приводит к стабилизации отношения V_2/V'_2 , причем эта величина становится меньше единицы, так как V_1 больше V'_1 и соответственно выше давление в ударном слое между вторичной и первичной УВ. Отличие от критических параметров газа в минимальном сечении сопла после установления связано с искривлением звуковой линии.

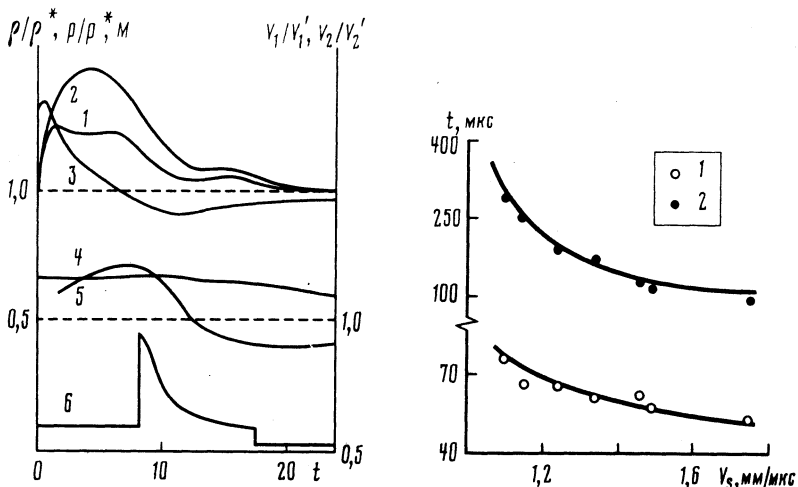


Рис. 3. Эволюция плотности (1); давления (2), числа Маха (3) в критическом сечении и плотности (6) в измерительном сечении, отнесенных к стационарным критическим значениям; 4 и 5 – изменение отношения скоростей распространения первичной V_1/V_1' и вторичной V_2/V_2' ударных волн по соплу со временем; $M_s = 5$

Рис. 4. Время запуска сопла в измерительном сечении в зависимости от скорости падающей УВ в ударной трубе. Время между отражением падающей УВ от торцевой стенки и приходом в измерительное сечение сопла первичной УВ (1) и установлением в измерительном сечении стационарного уровня сигнала поглощения (2)

Профиль сверхзвуковой части сопла влияет на геометрию основных возмущений. В профилированном сопле с большим начальным углом раствора продолжительность запуска может увеличиваться за счет времени, необходимого для выравнивания параметров потока по сечению [10].

Результаты численного анализа использовались для сопоставления с экспериментальными данными по измерению поглощения в сверхзвуковом потоке излучения с длиной волны 10,6 мкм. Подробности экспериментальной методики и детали расшифровки полученных осциллограмм поглощения можно найти в [9], отметим только, что опыты проводились в ударной трубе большого диаметра с профилированным соплом, геометрия которого рассматривалась в численном исследовании. Сверхзвуковой поток азота с небольшими (до 8%) примесями углекислого газа зондировался лазерным излучением на расстоянии 78 мм от критического сечения сопла.

Ранее показано [5, 9], что по осциллограммам поглощения можно надежно определить момент прохождения первичной УВ и продолжительность установления стационарного уровня поглощения в измерительном сечении сопла. Полученные таким образом экспериментальные данные приведены на рис. 4. Сплошными кривыми показаны полученные из расчета промежутки времени до прихода в измерительное сечение первичной и вторичной ударных волн. По оси абсцисс на графике отложены значения V_s скорости падающей ударной волны в ударной трубе, а по оси ординат – время, отсчитываемое от момента отражения падающей УВ от торцевой стенки трубы. Согласие с расчетом экспериментальных точек 1 на графике показывает, что вязкость газа, которая в численном анализе не учитывалась, слабо влияет на траекторию движения по соплу первичной УВ в процессе запуска. К подобному выводу приводят и результаты, полученные ранее для сопел с прямолинейными образующими [5–8].

Сложная зависимость поглощающих свойств потока от параметров течения не позволяет выделить влияние малых отклонений от стационарности на амплитуду и форму поглощенного сигнала, можно лишь утверждать, что с точностью $\sim 10\%$ экспериментальные точки 2 на графике соответствуют продолжительности установления стационарного уровня сигнала на осциллограмме. Вместе с тем, обращаясь к данным численного анализа (см. рис. 3, кривая б), легко увидеть, что параметры потока приближаются к стационарным значениям сразу после прохождения в измерительном сечении вторичной УВ. Совпадение с расчетом экспериментальных точек 2 на рис. 4 подтверждает, что в полном соответствии с данными численного анализа процесс запуска рассмотренного профилированного сопла определяется прохождением через измерительное сечение вторичной УВ. Поскольку результаты измерений совпали с расчетом в широком диапазоне изменения скорости V_s , можно предположить, что в рассмотренных условиях эффекты взаимодействия вторичной УВ с пограничным слоем на стенке [1] не оказывают существенного влияния на скорость вытеснения вторичной УВ из сопла. В значительно большей степени скорость вытеснения зависит от геометрии и размеров сопла, поэтому для сопел с развитой дозвуковой частью использование стационарных граничных условий в критическом сечении [5–8] может привести к большим погрешностям в расчетном определении времени запуска.

Авторы благодарны В.П. Стулову за постоянное внимание к работе и полезные дискуссии.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступило
18 I 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
2. Гринь В.Т., Крайко А.Н., Славяков Н.Н. – Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 6, с. 117–123.
3. Кулагина О.В., Пирумов У.Г., Росляков Г.С. В кн.: Вычислительные методы и программирование. М.: Изд-во МГУ, 1983, вып. 38, с. 78–92.
4. Atapp H.O. – Z. Flugwiss., 1971, Bd. 19, № 10, S. 393–406.
5. Британ А.Б., Григоренко В.Л. – ЖПМиТФ, 1982, № 1, с. 90–95.
6. Станкус Н.В. Препринт Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1983, № 101.
7. Smith C.E. – J. Fluid Mech., 1966, vol. 24, part 4, p. 625–640.
8. Григоренко В.Л. – Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 1, с. 120–127.
9. Британ А.Б., Жилин Ю.В., Мазманяц А.П. – Там же, 1979, № 6, с. 152–156.
10. Британ А.Б., Васильев Е.И. – Там же, 1984, № 4, с. 100–105.