

ФОРМИРОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ СТРУИ ВНУТРИ СОПЛА В ПРОЦЕССЕ ЕГО УДАРНОГО ЗАПУСКА

Л. Г. ГВОЗДЕВА, Ю. В. ЖИЛИН

(Москва)

Вопрос о взаимодействии ударной волны с сужающимся – расширяющимся каналом имеет большое прикладное значение в задачах воздействия ударных волн на преграды и в задачах о запуске сверхзвуковых сопел. Экспериментально и теоретически взаимодействие ударной волны с соплом рассматривалось в работах [1–6]. Эксперименты обнаруживают сложную двумерную картину течения. В расширяющейся части сопла образуется комплекс из проходящей волны, контактной поверхности и обращенной волны. Взаимодействие обращенной волны с пограничным слоем в сопле вызывает отрыв потока [3]. В области между горлом сопла и комплексом ударных волн какое-то время существует нестационарная волна разрежения [5].

Из-за сложности картины численные методы расчета пока не получили широкого применения в данной задаче. Численный расчет и сравнение с одним экспериментом приведены лишь в одномерном приближении [6]. Для оценки скоростей проходящей и обращенной волн используют обычно метод Чизнелла [1] и асимптотический метод распада произвольного разрыва [2, 3]. В существующих работах исследовались такие режимы работы сопел, когда система из трех волн проходила через сопло, и в нем устанавливалось одномерное течение. Время запуска сопла определялось поэтому или временем прохождения через сопло обращенной волны [3], или временем прохождения нестационарной волны разрежения [5].

В настоящей работе исследовались такие режимы течения, когда взаимодействие обращенной волны с пограничным слоем вызывало отрыв потока, формирование струи и, соответственно, удлиняло время запуска сопла. Исследовалось нестационарное взаимодействие обращенной ударной волны с пограничным слоем.

Получена волновая картина ударного запуска сверхзвукового сопла в случае формирования перерасширенной струи в сопле. Волновая схема подтверждена экспериментальными данными по измерению давления и температуры на поверхности сопла. Получена экспериментальная зависимость критерия отрыва для нестационарного взаимодействия ударной волны с пограничным слоем от числа Маха потока и сравнена с теоретическими данными.

1. Эксперименты проводились на ударной трубе квадратного сечения 72×72 мм² с плоским отражающим соплом в торце трубы. Опыты проводились в воздухе, азоте и смеси 10% CO₂+40% N₂+50% He. Числа Маха ударных волн менялись от 2 до 6. Исследовались три типа сопел с полууглами при вершине сопла 5, 15, 30°. Сопла рассчитаны на числа Маха на срезе 3.2; 4.8 и 4.2. Высота критического сечения равнялась 4, 2 и 6 мм, радиусы кривизны в горле сопла 5, 4 и 5 мм.

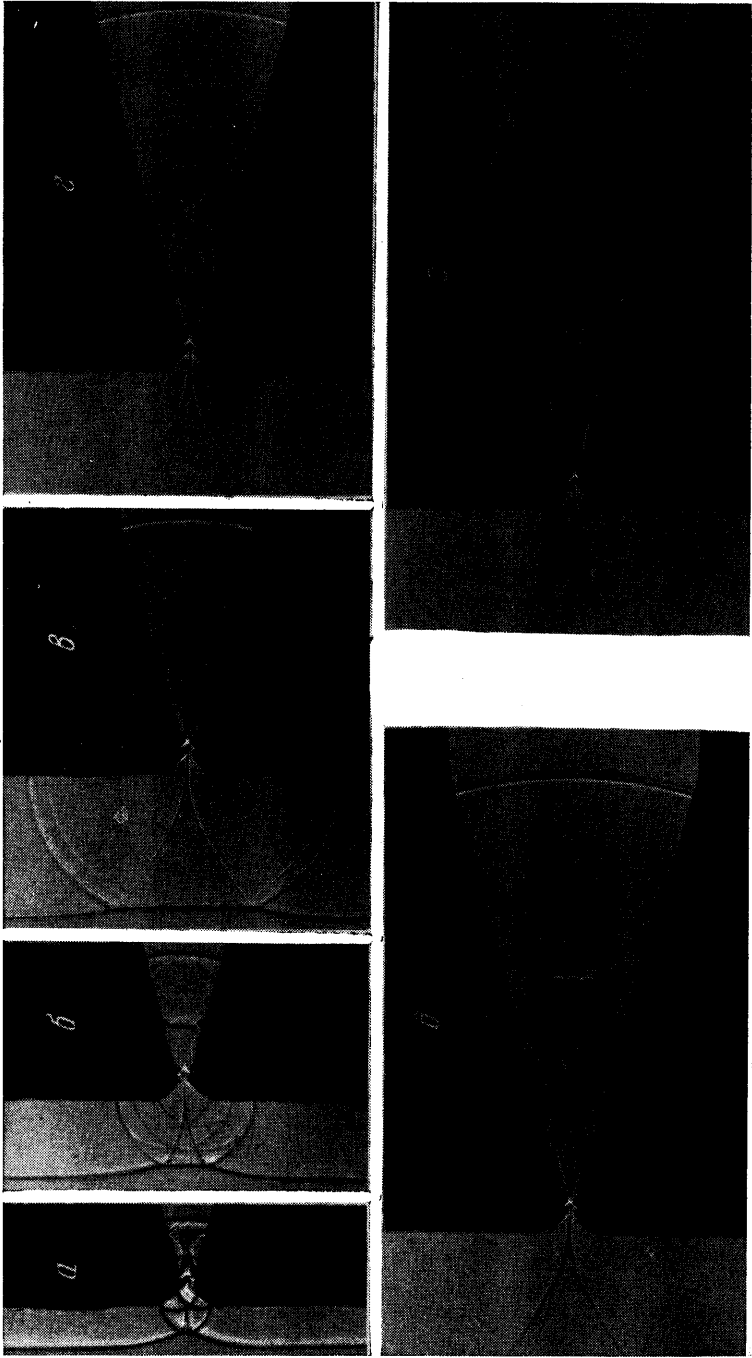
Применялись следующие методы исследования процесса. Получались одиночные тепловровские фотографии процесса. Импульсный источник света – электрическая искра в воздухе, длительность разряда ~0.1 мксек. Синхронизация и задержка импульса осуществлялись с помощью пьезодатчика давления, предусилителя и генератора задержанных импульсов Г5-15. Можно было получать кадры, соответствующие различным стадиям процесса. Для регистрации применялась аэрофотопленка тип 15-800 чувствительностью 1200 ед. В опытах были получены также теневые снимки процесса запуска. Для получения параллельного пучка света ис-

пользовалась коллиматорная часть прибора ИАБ-451, а изображение регистрировалось на фотопленке, прижатой к оптическому стеклу экспериментальной секции.

Получались также непрерывные фоторазвертки процесса во времени, которые дают x, t -диаграмму процесса. Для получения разверток применялись импульсные лампы ИФК-50, через которые разряжалась батарея конденсаторов 2500 мкф, заряженная до 200 в. Развертки регистрировались прибором ЖФР-1. При получении разверток щель устанавливалась двумя способами: вдоль оси сопла и вдоль его образующей. В первом случае по фотографиям можно было определить координаты и скорости контактной поверхности, первичной, стартовой, отраженной и обращенной волн. Во втором случае можно было определить координаты и скорости движения точек отрыва и присоединения потока, что помогало расшифровать осциллограммы давления и температуры поверхности. Измерения давления проводились на боковой поверхности сопла с помощью миниатюрного пьезоэлектрического датчика давления. Датчик позволял измерять статическое давление внутри сопла с пространственным разрешением не более 1 мм при частотах от 1 до 100 кгц. При чувствительности пьезодатчика 3 мВ рт.ст./мВ и числах Маха ударных волн $M_0 < 3$ удавалось измерить статическое давление внутри сопла с погрешностью не выше 20%. Параллельно с измерениями давления проводились измерения температуры стенки сопла с помощью тонкопленочного платинового термометра сопротивления.

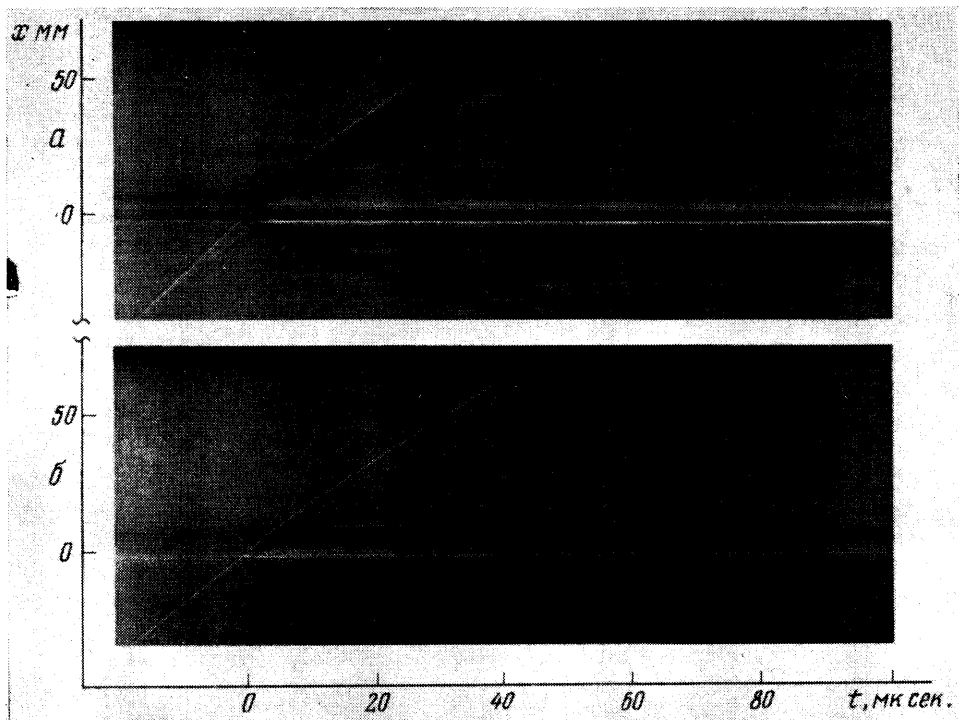
2. С помощью серии последовательных тепловых и теневых фотографий удалось проследить последовательные стадии формирования струи в сопле. На фиг. 1 приведен ряд кадров для чисел Маха падающих волн, равных $M_0 = 1.8 \pm 0.1$ (сопло с углом полуоткрытия 15°), $p_0 = 30$ мм рт.ст., воздух.

Ударная волна падала на сопло слева направо. При взаимодействии с узкой частью волна распадается на отраженную волну и стартовую волну, проходящую в сопло. Формирование отраженной волны происходит путем последовательных маховских отражений. На первом кадре (фиг. 1, а), сделанном через 10 мксек после падения ударной волны на торец, отраженная волна еще не имеет плоской формы. В центре трубы видны две симметричные маховские конфигурации. Стартовая волна при движении по расширяющемуся каналу ослабевает, скорость газа за ней падает. Одновременно скорость сверхзвукового потока газа в сопле растет. Вследствие этого в сопле формируется обращенная волна, которая видна на фиг. 1, б в момент времени $t = 25$ мксек. Эта волна обращена к горлу сопла, ноносится вниз по потоку. На отраженной волне увеличилась прямолинейная часть, соответствующая маховскому стеблю. Хорошо видны тангенциальные поверхности разрыва. Обращенная волна начинает взаимодействовать с пограничным слоем. И на верхней, и на нижней стенках возникают лямбда-конфигурации, типичные для взаимодействия ударной волны с пограничным слоем. Такой ход развития процесса был исследован в [2, 3]. Но параметры опыта и размеры сопла там были такие, что система из стартовой и обращенной волн всегда выносилась из сопла. В исследуемом случае точки отрыва потока сначала двигаются вниз по соплу, а затем останавливаются. Участки косых волн увеличиваются в размерах, и, наконец, происходит их пересечение. Снимок на фиг. 1, в соответствует моменту $t = 50$ мксек, когда косые волны в лямбда-конфигурации пересеклись. Виден отрыв потока и два задних скачка в лямбда-конфигурации, возникающие при отрыве потока и отклоняющие газ к стенкам сопла. Косые скачки пересекаются регулярным образом на последующем кадре (фиг. 1, г; $t = 75$ мксек).



Фиг. 4

Так как стартовая волна продолжает ослабляться, а поток после прохождения точки пересечения расширяется в сопле, то продолжает оставаться необходимость согласования потоков, и за точкой пересечения снова зарождается обращенная волна (фиг. 1, *д*; $t=100$ мксек). Область отрывного течения увеличивается. В срывном течении газ сначала отрывается от стенки, а затем поворачивает к ней. В срывной зоне были обнаружены ударные волны, возникающие при торможении возвратного потока. Эти скачки видны в виде черточек на верхней и нижней стенках в срывной зоне. Они направлены так же, как стартовая волна, а их число Маха — порядка 1.4. На последнем снимке (фиг. 1, *е*) видно формиро-



Фиг. 2

вание второго пересечения косых ударных волн. Внутри сопла сформировалась струя ($t=150$ мксек).

Интересной деталью картины являются также два косых скачка вблизи горла сопла, в месте сопряжения скругления с прямой расходящейся частью. В работах [7, 8] было установлено, что при стационарном течении в конических соплах со скруглением в горле, в точке сопряжения должны возникнуть косые скачки, не связанные с перерасширением потока. В приведенных экспериментах с плоскими сверхзвуковыми соплами, видимо, зарегистрированы аналогичные скачки, появление которых в процессе запуска можно считать признаком установления квазистационарности вблизи горла.

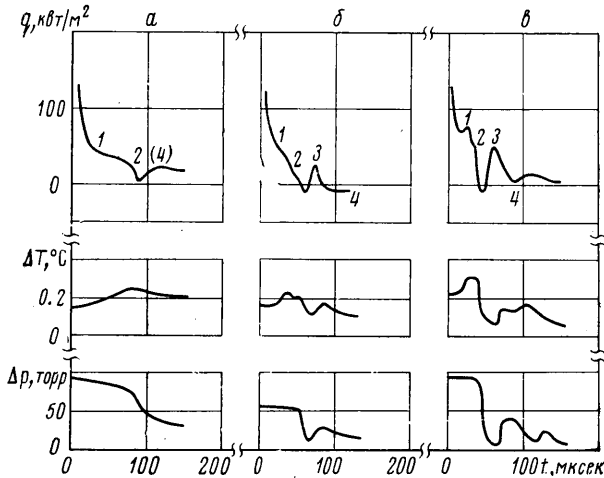
На фиг. 2 представлены типичные развертки процесса запуска в смеси $10\% \text{CO}_2 + 40\% \text{N}_2 + 50\% \text{He}$ при $T_0=20^\circ \text{C}$.

Развертка 2а соответствует режиму: $u_0=2.03$ км/сек, $p_0=32$ мм рт.ст. Щель располагалась вдоль оси сопла. Видно падающую волну, формиро-

вание отраженной волны, стартовую волну. Раздвоение темной полосы, которое можно наблюдать через 30 мксек после момента отражения, соответствует пересечению косых ударных волн на оси сопла. В этом случае точка пересечения скачков сдвигается вниз по соплу, а затем останавливается в сечении сопла $x=50$ мм. Фиг. 2, б соответствует режиму: $u_0=1.63$ км/сек, $p_0=50$ мм рт.ст. Видно, что точка пересечения двигается вниз по соплу, останавливается, потом формируется второе пересечение, затем третье.

Интересно отметить, что движение обращенной волны носит колебательный характер.

Как следует из опытов (фиг. 1), форма струи при запуске аналогична форме струи, возникающей в соплах при стационарном течении с пере-



Фиг. 3

расширением. Струя в случае ударного запуска образуется также из-за перерасширения потока.

В результате обработки данных эксперимента было получено, что давление за точкой отрыва в несколько раз больше начального давления p_0 и определяется давлением за стартовой волной. Поэтому вид струи и время ее существования зависит от условий ниже среза сопла. При переходе в прямой канал (как это было в исследуемом случае) «противодавлением» будет давление за несколько усиленной волной в прямом канале. Струя будет квазистационарной в течение движения стартовой волны по прямому каналу. При изменении условий за стартовой волной (например, при резком расширении на срезе сопла) размеры струи будут меняться в соответствии с условиями за волной. Следствием описанного процесса является увеличение времени запуска сопла в тех режимах, где может формироваться струя. Процесс взаимодействия обращенной ударной волны с пограничным слоем является определяющим для оценки возможности запуска.

3. Измерения давления и теплового потока подтвердили расшифровку волновой картины в сопле. На фиг. 3 приведены осциллограммы давления и температуры, полученные для азота с начальным давлением $p_0=30$ мм рт.ст. в трех соплах при следующих параметрах: а— $\alpha_0=5^\circ$, $M_0=2.2$ (датчики устанавливались на расстоянии 90 мм от горла сопла); б— $\alpha_0=15^\circ$, $M_0=2.1$ (50 мм от горла); в— $\alpha_0=30^\circ$, $M_0=2.3$ (25 мм от горла).

Мимо датчиков проходят последовательно стартовая волна (ее прохождение совмещено с началом координат), контактная поверхность 1, точка присоединения потока 2, пристенная волна 3, точка отрыва потока 4.

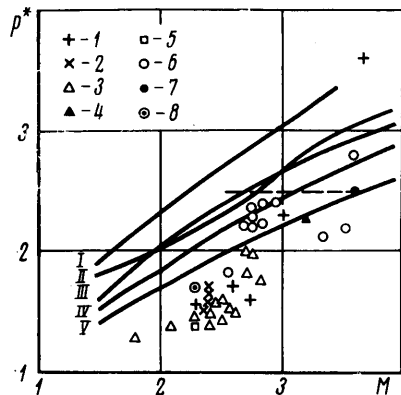
Для сопла с полууглом раствора 5° запись давления показывает подъем в стартовой волне и падение давления после прохождения мимо датчика обращенной волны. В области между стартовой волной и обращенной давление не постоянно, а падает от стартовой волны к обращенной, что находится в согласии с результатами по измерению плотности в работе [3]. В этом случае взаимодействие обращенной ударной волны с пограничным слоем очень мало и отрыв не возникает. В соплах с полууглами 15° и 30° происходит отрыв потока. На осциллограммах давления четко фиксируется подъем давления в пристенной волне. Она также оказывает существенное влияние на нестационарный теплообмен, вызывая местное повышение теплового потока. Интересно также, что в зоне отрыва и возвратного течения температура газа понижается настолько, что тепловой поток становится отрицательным, т. е. температура газа становится ниже температуры стенки. На фиг. 3 для сопла с полууглом 30° фиксируется также перепад давления в косой волне при отрыве потока.

Измерения углов наклона косых скачков в точках отрыва на тепловых снимках позволили определить отношение давлений на них при отрыве. Результаты такого расчета изображены на графике фиг. 4.

Значения отношений давлений P^* отнесены к числам Маха потока в том сечении сопла, где происходил отрыв. Число Маха рассчитывалось из условий изэнтропического стационарного одномерного течения. Параметры за отраженной волной определялись по скорости отраженной волны. Предполагалось, что газ внутри сопла расширяется с постоянным показателем адиабаты $\gamma=1.4$.

На фиг. 4 проведено также сравнение экспериментальных результатов с кривыми для стационарного отрыва. Кривая I взята из работы [9], кривая II — из [10], кривая III — из [11], пунктир соответствует эмпирическому соотношению [12], а кривые IV и V — полуэмпирическому критерию отрыва [13], причем верхняя кривая соответствует отношению характерной скорости к скорости в ядре, равной 0.6, что подтверждается работами по стационарному отрыву в соплах, а нижняя кривая — отношение скоростей 0.56, что совпадает с условиями отрыва на выступах и вогнутых поверхностях.

Экспериментальные данные для сопла с полууглом 15° , высотой критического сечения 2 мм при начальном давлении в сопле 150 мм рт.ст. представлены на фиг. 4 точками 1, 2 (1 — азот, 2 — воздух); для сопла с полууглом 15° и высотой критического сечения 6 мм — точками 3–5, газ — азот (3, 4, 5 — $p_0=30, 10, 40$ мм рт.ст. соответственно); для сопла с полууглом 30° — точками 6–8, газ — азот (6, 7, 8 — $p_0=30, 40, 10$ мм рт.ст. соответственно). Как видно из фиг. 4, результатам экспериментов больше всего соответствует, пожалуй, критерий Гэдда [13].



Фиг. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ackroyd J. A. D.* A study on the running times in reflected shock tunnels. *Aeronaut. Res. Council. Current Papers*, 1967, No. 883.
 2. *Amann H. O.* Vorgänge beim Start einer ebenen Reflexionsduse. *Z. Flugwiss.*, 1971, Bd 19, Nr 10.
 3. *Amann H. O.* Experimental study of the starting process in a reflection nozzle. *Phys. Fluids.*, 1969, vol. 12, No. 5.
 4. *Smith C. E.* An analytic study of a starting process in a hypersonic nozzle. *Proc. 1964. Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., Stanford Calif, Univ. Press.*, 1964.
 5. *Smith C. E.* The starting process in a hypersonic nozzle. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 24, No. 4.
 6. *Marmey R., Guibergia J. P.* Etude experimentale des phenomenes accompagnant l'amorçage d'une tuyere hypersonic. *Compt. Rend. Acad. Sci. Ser. A*, 1970, vol. 271, No. 2.
 7. *Migdal D., Landis F.* Characteristics of conical supersonic nozzles. *ARS Journal*, 1962, vol. 32, No. 12.
 8. *Бэк Л., Каффел Р.* Определение косых скачков уплотнения в коническом сопле с критическим сечением в виде дуги окружности. *Ракетная техника и космонавтика*, 1966, т. 4, № 12.
 9. *Чжен П. К.* Отрывные течения, т. 1. М., «Мир», 1972.
 10. *Степанов Г. Ю., Гогин Л. В.* Квазидномерная газодинамика сопел ракетных двигателей. М., «Машиностроение», 1973.
 11. *Mager A.* On the model of the free, shock — separated, turbulent boundary layer. *J. Aeronaut. Sci.*, 1956, vol. 23, No. 2.
 12. *Summerfield M., Foster C. R., Swan W. C.* Flow separation in overexpanded supersonic nozzles. *Jet Propuls.*, 1954, vol. 24, No. 5.
 13. *Gadd G. E.* Interactions between wholly laminar or wholly turbulent boundary layers and shock waves strong enough to cause separation. *J. Aeronaut. Sci.*, 1953, vol. 20, No. 11.
-