

При наличии на входах транспарантов матриц  $A$  и  $B$  возможны три состояния системы, включен один зеленый источник, один красный или оба. С учетом поляризационного раздвоения изображений в призме Волластона получаем на выходе системы реализацию 6 логических функций, причем в этом случае быстрдействие ограничивается только скоростью переключения источников. Возможны еще три состояния на входах (отсутствие матриц, только  $A$  или только  $B$ ), что увеличивает число реализуемых функций. Скорость смены изображений на входах ограничивается быстрдействием транспарантов.

К основным особенностям предложенного метода следует отнести следующие.

1. Все 16 логических функций реализуются параллельно.

2. В системе просто реализуется любая операция комбинаторной логики, так как применяемый метод требует только переключения источников излучения, что легко обеспечивает программируемость системы.

3. Применение ОУТ, обладающего широкими функциональными возможностями (усиление, возможностью считывания когерентным светом, высокой чувствительностью, низким напряжением питания и малой потребляемой мощностью), позволит создать достаточно простые и гибкие узлы ОВМ.

4. В системе не требуются электронные или механические дефлекторы.

5. Использование ОУТ с обратной связью [8] позволяет реализовать пороговые устройства и запоминание бинарного изображения. К недостаткам ОУТ следует отнести невысокую разрешающую способность (30 лин/мм) и большое время переключения.

Представленный метод является одним из перспективных при реализации параллельной оптической обработки. Возможно, что его дальнейшее развитие позволит создать достаточно простые схемы решения оптических вычислительных машин.

### Литература

- [1] Хуан А. ТИИЭР, 1984, т. 72, № 7, с. 34—42.
- [2] Егоров В. М., Косцов Э. Г. Автометрия, 1985, № 1, с. 114—125.
- [3] Lahmann A. W., Weigelt J. Appl. Opt., 1987, v. 26, N 1, p. 131—135.
- [4] Fatehi M. T., Wasmundt R. C., Collins S. A. Appl. Opt., v. 20, N 13, p. 2250—2256.
- [5] Итйока Е., Танида Д. ТИИЭР, 1984, т. 72, с. 42—58.
- [6] Грибов В. Г., Думаревский Ю. Д., Кавтонюк И. Ф. и др. Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1981, № 5, с. 82—87.
- [7] Воеводин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Нефедов С. М. Письма в ЖТФ, 1986, № 122, с. 1373—1377.
- [8] Воеводин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. Н., Нефедов С. М. Квант. электр., 1988, т. 15, № 4, с. 805—811.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
14 октября 1987 г.

## О ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ В ПЛОСКОМ СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ

Б. М. Добрынин, В. Г. Масленников, В. А. Сахаров

При работе сверхзвуковых сопел в условиях существенного перерасширения потока газа ( $N < 0.5$ ) возможно возникновение отрывного течения. При этом внутри сопла образуются косые скачки уплотнения, которые взаимодействуют с пограничным слоем на стенках сопла и вызывают его отрыв. Анализ опубликованных теоретических и экспериментальных исследований [1—3] показывает, что основной проблемой в такого рода течениях является определение положения точки отрыва потока от стенок сопла. Показано, что ее положение зависит не только от давления во внешней среде, но и от формы сопла и характера взаимодействия вязкого и невязкого потоков внутри сопла и за ним. До настоящего времени не изучена зависимость локализации точки отрыва потока в сопле от рода истекающего из него газа.

Экспериментальные исследования квазистационарных отрывных течений различных газов в сверхзвуковых клиновидных соплах проводились на ударной трубе ФТИ в режиме отражения падающей ударной волны от торца трубы, где располагалось сопловое устройство, позволяющее с помощью тонкой диафрагмы разделять истекающий газ и затопляющую струю-среду, а также варьировать в широких пределах нерасчетность истечения. В качестве истекающего газа использовались аргон, азот, углекислый газ и тетрафторметан. Параметры истекающего газа определялись по числу Маха падающей ударной волны ( $M=1.5-3.5$ ) и считались равными параметрам торможения газа за отраженной ударной волной. Постоянное давление на входе в сопло при этом сохранялось в течение 2—3 мс, что позволяло достигать квазистационарной фазы отрывного течения за рабочее время установки. Число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам газа в критическом сечении сопла, изменялось в диапазоне от  $10^6$  до  $5 \cdot 10^6$ . Для создания сверхзвукового потока использовались клиновидные сопла с углом полураствора 11, 15 и  $30^\circ$  и отношениями площадей выходного и критического

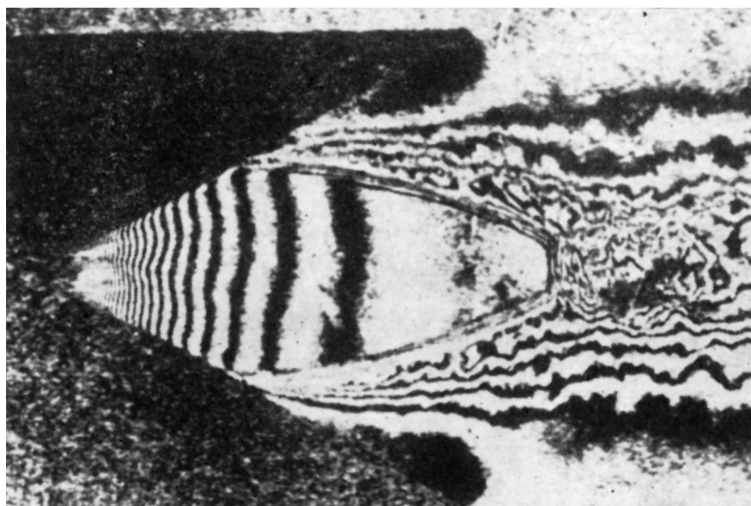


Рис. 1. Интерферограмма истечения тетрафторметана в водород.

поперечных сечений, равными 10, 30 и 50 соответственно. Наиболее полно исследовалось истечение из сопла с  $\Theta=11^\circ$ . В качестве затопляющей среды использовались как выше названные рабочие газы, так и легкие газы гелий и водород.

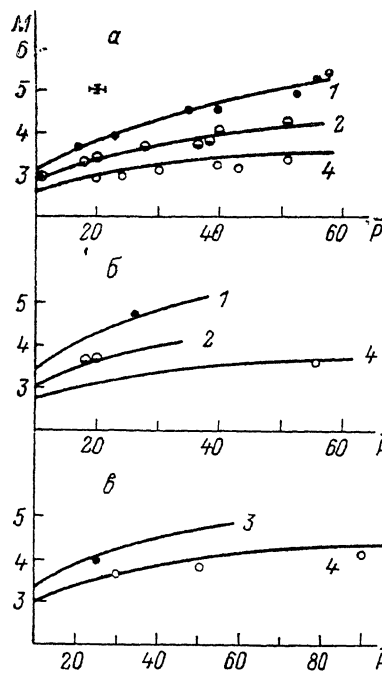
Использование плоской геометрии течения позволяет применить оптические методы регистрации потока внутри сопла. Визуализация течения осуществлялась с помощью интерферометра сдвига, созданного на базе оптического прибора ИАБ-451, а также теньевым методом.

Применение в качестве затопляющей среды легких газов, обладающих малым показателем преломления, позволяет визуализировать на интерферограмме только поле течения струи истекающего газа. На рис. 1 показана интерферограмма отрывного течения тетрафторметана в клиновидном сопле с углом полураствора  $\Theta=30^\circ$  в случае истечения в водород. Если пренебречь малым вкладом в оптическую длину пути, даваемым водородом по сравнению с тетрафторметаном, то при настройке интерферометра на бесконечно широкую полосу можно считать, что интерферограмма фиксирует изопикины поля течения. Интерферограмма (рис. 1), снятая таким образом, показывает, что истекающий газ после прохождения косого скачка уплотнения двигается приблизительно параллельно плоскости симметрии течения. В том случае, когда истечение происходит в оптически более плотные, чем водород и гелий, рабочие газы, визуализировать поле течения оторвавшейся от стенок сопла струи таким образом не удастся. Однако форма и угол наклона наблюдаемого скачка уплотнения при фиксированном положении точки отрыва, как показал эксперимент, и в этом случае оказываются примерно одинаковыми. Отсюда можно предположить, что газ за точкой отрыва истекает без заметного расширения независимо от состава затопляющей струю среды.

Пьезодатчиком давления типа И-24-2156, закрепленным на образующей сопла с  $\Theta=11^\circ$ , было измерено давление за точкой отрыва при истечении струи в пространство, заполненное

различными газами. Анализ этих измерений показал, что отношение давления за точкой отрыва к давлению затопляющего газа ( $P_\infty$ ) при истечении тетрафторметана в гелий, азот, углекислый газ и тетрафторметан изменяется в пределах от 1 до 0.7 по мере увеличения молекулярного веса затопляющего струю газа. Отношение давления на входе в сопло ( $P_0$ ) к давлению  $P_\infty$  сохранялось при этом постоянным и равным 25.

Основываясь на полученных в эксперименте результатах, предлагается рассмотреть упрощенную модель отрывного течения в клиновидном сопле. Предположим, что слой газа вблизи



образующей сопла в точке отрыва потока поворачивается на угол  $\Theta$  аналогично с тем, как это происходит при сверхзвуковом обтекании клина с образованием присоединенного скачка уплотнения. Будем считать также, что в квазистационарном режиме истечения давление за косым скачком уплотнения равно давлению во внешнем пространстве. Тогда при заданных  $\bar{P} = P_0/P_\infty$  и угле полураствора  $\Theta$  можно построить расчетную зависимость  $\bar{P} = f(M)$ , где  $M$  — число Маха стационарного потока в сопле перед точкой отрыва, определяемое степенью расширения потока и показателем адиабаты рабочего газа.

На рис. 2 эти зависимости, рассчитанные для газов с различным значением показателя адиабаты (1 —  $C_p/C_v = 1.67$ , 2 — 1.4, 3 — 1.29, 4 — 1.16) при трех выбранных значениях угла полураствора сопла, сопоставляются с результатами измерений положения

Рис. 2. Зависимость значения числа  $M$  в точке отрыва потока от отношения давлений  $\bar{P}$ .

$\Theta$ , град: а — 11, б — 15, в — 30.

точки отрыва в соплах при тех же начальных условиях истечения (его геометрии, роде истекающего газа и значении  $\bar{P}$ ).

Несмотря на простоту предложенной модели, как показывает такое сопоставление, она может с успехом быть использована для оценочных расчетов квазистационарного положения точки отрыва в клиновидных соплах, и, что особенно важно, для определения минимального значения  $\bar{P}$ , при котором возможен полномасштабный безотрывный режим работы сопла, рассчитанного на определенное значение числа Маха на его выходе при истечении того или иного рабочего газа.

Следует отметить, что предложенный метод расчета положения точки отрыва течения в клиновидном сопле перестает удовлетворительно соответствовать наблюдательным данным при истечении аргона из сопла с высоким темпом расширения потока ( $\Theta = 30^\circ$ ). При меньших значениях угла полураствора для всех газов совпадение результатов расчета и экспериментальных данных вполне удовлетворительное.

### Литература

- [1] Чжен П. Отрывные течения, т. 1. М.: Мир, 1972. 299 с.
- [2] Степанов Г. Ю., Гогин Л. В. Квазидномерная газодинамика сопел ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1973. 168 с.
- [3] Балженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
20 октября 1987 г.