

УДК 53.087.5+534.122

А.П. Петров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича,  
СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,  
E-mail: admin@itam.nsc.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ПЛОСКОМ СОПЛЕ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Приводятся результаты экспериментального исследования по выявлению особенностей течения однородного потока в предсопловом объеме и в сопле плоской формы при различных углах входа потока в дозвуковую часть.

### **СВЕРХЗВУКОВОЕ СОПЛО, ТЕНЕВЫЕ МЕТОДЫ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Для управления движением летательного аппарата (ЛА) в соответствии с требуемой траекторией необходимо иметь возможность изменять величину и направление вектора скорости, а также ориентацию осей ЛА в пространстве. С этой целью используются реактивные двигатели и различные органы управления, действие которых создает необходимые для управления силы и моменты. Одним из наиболее простых методов управления вектором тяги является поворотное сопло. При этом в процессе работы меняются условия входа потока в сопло, что отражается на величине удельного импульса тяги.

Максимальную тягу сопло обеспечивает, если формирует в выходном сечении параллельный поток с одним и тем же значением скорости в любой точке этого сечения. Для достижения этого необходимо понимать, что происходит не только в сверхзвуковой, но и в до-, транс-звуковой частях сопла и как это отражается на течении в сопле?

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Объект исследования представлял собой канал газохода с поворотным плоским соплом (рис. 1). Сопло (2) на  $M=2,71$  соединялось с каналом (1) через сменные вкладыши (4), набор которых позволял дискретно через  $10^0$  менять направление оси сопла относительно оси канала от  $0^0$  до  $50^0$ . Боковые (плоские) стенки сопла выполнены из оптического стекла.

Различными оптическими методами [1] на теневой установке, работающей в параллельных лучах, визуализировались особенности течения однофазного потока газа в предсопловом объеме и в сопле плоской формы ( $M = 2,71$ ) при различных углах входа потока в дозвуковую часть. Исследования оптическими методами дополнялись пневмометрическими измерениями. Для этого образующие дозвуковой части, и профиль сопла имели дренажные каналы (3), подключенные к групповым регистрирующим манометрам типа ГРМ-2. Давление в дозвуковой зоне сопла определялось образцовым манометром.

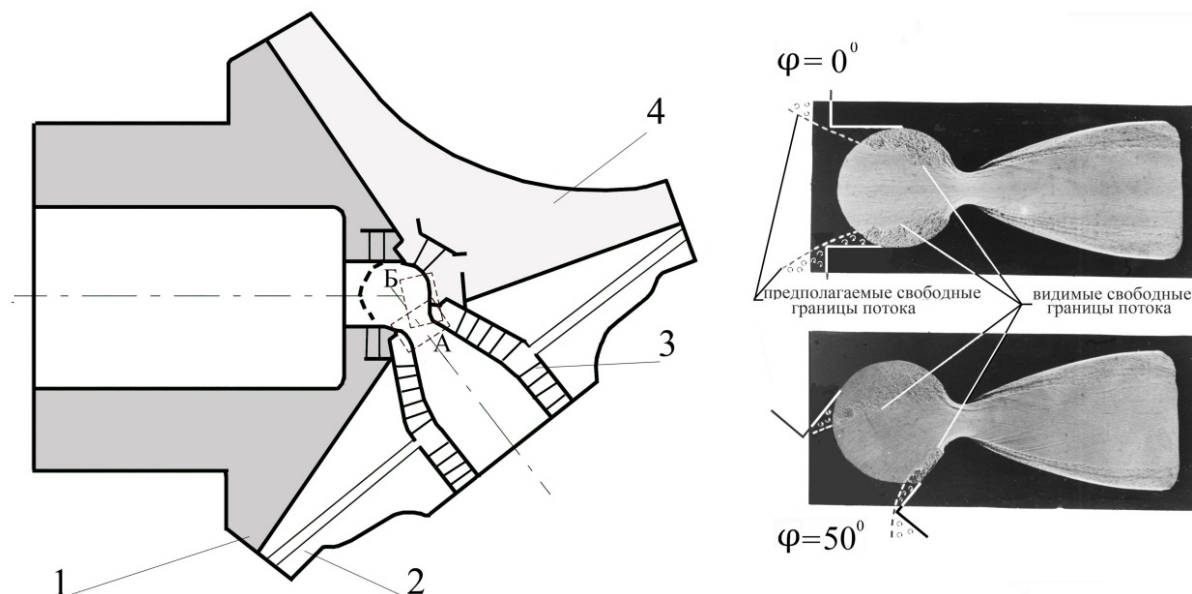


Рис.1. Схематический разрез экспериментальной установки: 1- канал газохода, 2-плоское сопло, 3- дренажные каналы по профилю сопла, 4- сменный вкладыш.

На рис. 1 приведены типичные прямотеневые снимки течения газа в сопле при  $P_c / P_a = 0,8$  ( $P_c$  – давление на срезе сопла,  $P_a$  – давление атмосферное) и углах входа потока в сопло  $\varphi = 0^\circ$  и  $50^\circ$ . В дозвуковой области сопла наблюдаются "застойные" зоны, которые равны и симметрично расположены по обе стороны от входа, если угол нулевой. При  $\varphi = 50^\circ$  верхняя застойная зона больше. Граница застойных зон имеет волнообразную форму. Вихри из этих зон захватываются потоком, поджимаются в критическом сечении и расширяются в сверхзвуковой части сопла, образуя два вихревых следа вверху и внизу.

Течение газа в областях А и Б сопла (рис.1) подробно исследовалось прямотеневым методом с регистрацией картины кинокамерой «Конвас-автомат КСР-1, синхронизированной с импульсной лампой ИШ-5. Скорость съемки была 24 кадра/сек. Длительность вспышки лампы составляла 1,5 мксек.

Киносъемка показала, что из "застойных" зон систематически наблюдается крупномасштабный прорыв вихрей в критическое сечение (Рис. 2). В глубине "застойной" зоны регулярно образуются вихревые "дорожки" (кадры 3,4), которые вытягиваются по потоку, занимая значительную часть критического сечения (Рис. 2 кадры 7÷10). Наличие "застойных зон" приводит к тому, что завихрения, образующиеся в дозвуковой части на границе струи и застойной зоны, являются источником повышенной турбулентности в сверхзвуковой части потока, неравномерной по сечению и по времени.

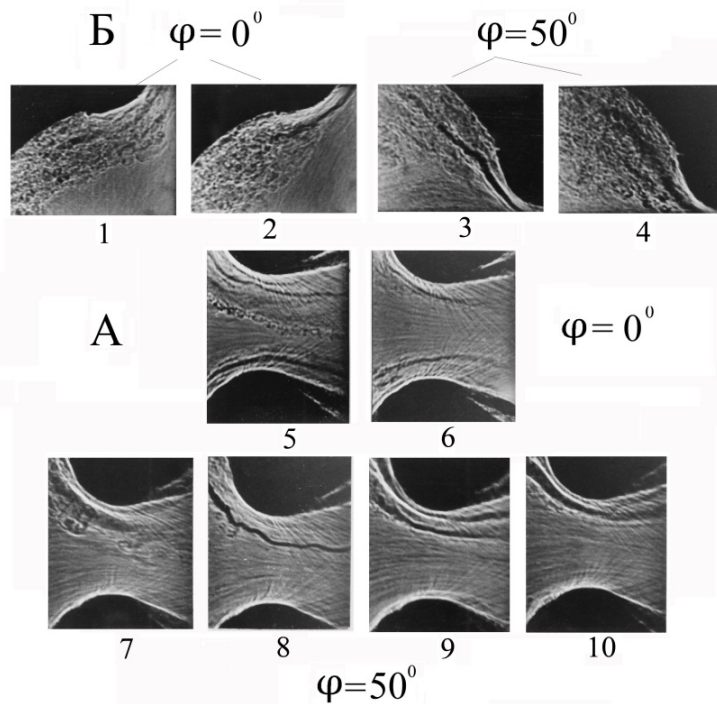


Рис. 2. Прямотеневые снимки картины течения в плоском сопле: область критики А- 5,6  $\varphi=0^{\circ}$ ; 7,8,9,10  $\varphi=50^{\circ}$ ; область свободной границы в дозвуковой части Б- 1,2  $\varphi=0^{\circ}$ ; 3,4

Прямым тeneвым методом хорошо визуализируются резкие изменения показателя преломления газа в дозвуковой и сверхзвуковой частях сопла. Другие методы дополняют общую картину, выявляя различные особенности течения.

Для изучения плавных изменений плотности среды был применен метод поляризационной интерферометрии [2]. Теневая установка была преобразована в поляризационный интерферометр. Щель и нож были заменены кварцевыми призмами Волластона. Для получения поляризованного света и наблюдения интерференционной картины перед первой призмой и за второй необходимо соответствующим образом установить поляриды. Если призмы Волластона стоят так, что фокусы коллимирующего и приемного объективов приходятся на преломляющие грани, то интерферометр будет настроен на полосы бесконечной ширины. Свет, падающий от источника, поляризован поляризатором на  $45^{\circ}$  по отношению к осям призм. Он расщепляется первой призмой Волластона на два пучка одинаковой интенсивности, ортогонально поляризованные друг к другу и расходящиеся на малый угол  $\varepsilon$ . После коллимирующего объектива, оба пучка становятся параллельными друг другу и смещены в боковом направлении на малое расстояние, равное  $f\varepsilon$ . ( $f$  – фокус объектива). Оба этих пучка проходят через исследуемую область, заключенную между защитными окнами, и собираются приемным объективом на вторую призму Волластона. Интерференционная картина, получающаяся после рекомбинации пучков второй призмой, через анализатор регистрируется фотоаппаратом «Киев-10».

Снимки, полученные методом поляризационной интерферометрии, позволяют визуализировать картины распределения градиентов плотности в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в зависимости от ориентации полос в призмах Волластона. На Рис.3 а, б, в, г приведены типичные фотографии таких картин для различных углов входа потока в сопло и направлений градиента плотности.. Снимки а и в визуализируют градиенты плотности перпендикулярные оси сопла, а снимки б и г градиенты плотности направленные вдоль оси.

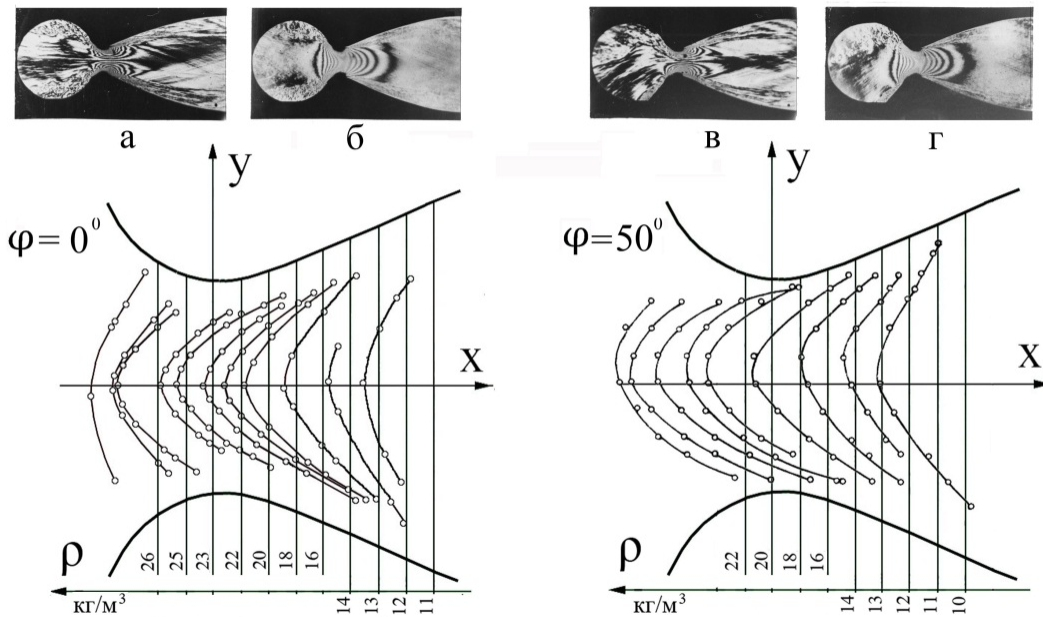


Рис. 3. Распределения плотности газа  $\rho$  в области критического сечения сопла для двух углов входа газа в дозвуковую зону.

Из обработки снимков, сделанных методом поляризационной интерферометрии, получены распределения плотностей  $\rho$  по сечениям в области горла сопла (рис.3) для двух углов входа потока в сопло. На схеме показаны сечения, для которых выполнен расчет. Расстояния между сечениями по оси  $x$  равно 2 мм. Чтобы графики выглядели компактно, на них показана переменная составляющая плотности, равная расстоянию от сечения до соответствующего ему графика. Полное значение плотности определяется прибавлением величины, показанной около каждого сечения. При  $\varphi = 0^\circ$  распределения плотностей в поперечных сечениях симметричны относительно оси сопла. Несимметрия потока в дозвуковой части при  $\varphi = 50^\circ$  приводит к смещению кривых распределения плотностей относительно оси сопла и существует в сверхзвуковой части. Мгновенные картины поля плотностей при  $\varphi = 50^\circ$  отличаются, что свидетельствует о том, что течение в сопле неустановившееся,

Пневмометрические измерения дополняют характеристику течения и выявляют усредненную по времени замера картину несимметрии в сопле. На рис.4 показан график

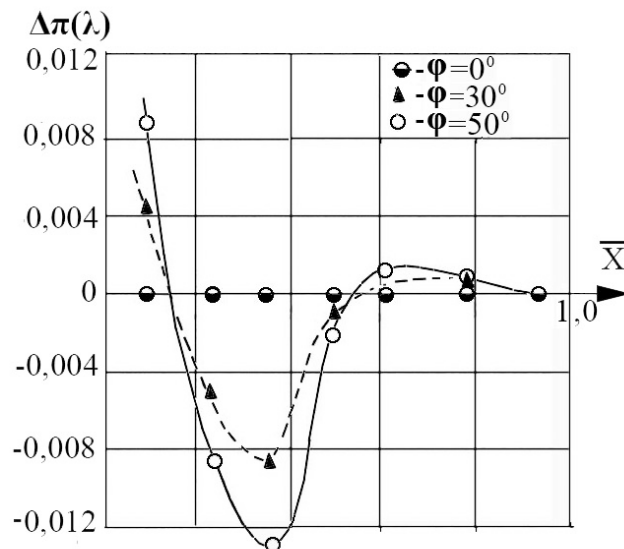


Рис. 4. График функции  $\Delta\pi(\lambda)$  по образующим сопла при различных углах входа потока  $\varphi$ .

функции  $\Delta\pi(\lambda) = f(\lambda)$ , имеющий вид сильно затухающей синусоиды.  $\Delta\pi(\lambda)$  - разность значений газодинамических функций  $\pi(\lambda)$  в симметричных точках на верхней и нижней образующих сопла. Это качественно согласуется с результатами работы [3]/

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследования показали, что наличие застойных зон в дозвуковой части, и несимметрия входа существенно влияет на течение в сопле. Несимметрия потока в дозвуковой части при  $\varphi = 50^\circ$  приводит к смещению кривых распределения плотностей относительно оси сопла и существует в сверхзвуковой части. Мгновенные картины поля плотностей при  $\varphi = 50^\circ$  отличаются, что свидетельствует о том, что течение в сопле неустановившееся.

Из "застойных" зон систематически наблюдается крупномасштабный прорыв вихрей в критическое сечение. В глубине "застойной" зоны регулярно образуются вихревые "дорожки", которые вытягиваются по потоку, занимая значительную часть критического сечения. Наличие "застойных зон" приводит к тому, что завихрения, образующиеся в дозвуковой части на границе струи и застойной зоны, являются источником повышенной турбулентности в сверхзвуковой части потока, неравномерной по сечению и по времени.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Васильев Л.А.**, Теневые методы. - М, 1968.
2. **Philbert M.**, Applications metrologiques de la strioscopie interferentielle, Revue d' Optique, t 37, № 12, 1958
3. **Дарвелл, Трабридж**, Профилирование сопел ракетных двигателей с точки зрения уменьшения несимметричности истечения, Вопросы ракетной техники, №8, 1968.

A.P.Petrov

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk, Institute st.,4/1, E-mail: admin@itam.nsc.ru*

## **STUDY OF GAS FLOW IN A FLAT NOZZLE OPTICAL METHODS**

*The results of the pilot study to identify the characteristics of the course of uniform flow in predoplovom volume and nozzle flat form in various corners of the entrance flow in a dozvukovuû part.*

## **SUPERSONIC NOZZLE, SHADOW TECHNIQUES**