

УДК 621.45.015.4:530.17

Н. П. Кузнецов, доктор технических наук, профессор
Р. А. Юртиков, С. М. Соловьев
Ижевский государственный технический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГИДРОГАЗОАНАЛОГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА НЕСИММЕТРИЧНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ

Описывается метод аналогового моделирования начального участка несимметричной сверхзвуковой газовой струи.

Ключевые слова: гидролоток, гидрогазоаналогия, сверхзвуковая газовая струя

Для ориентации в пространстве космических аппаратов и головных частей, а также для управления вектором тяги ракетного двигателя на верхних ступенях ракет широко применяются сопловые управляющие блоки, имеющие переменное критическое сечение [1]. В таких блоках критическое сечение в зависимости от программы работы перекрывается на заданную величину заслонкой или ротором. При частичном перекрытии минимального сечения соплового блока нарушается как симметрия сопла, так и течения в нем, возникают отраженные скачки уплотнения и волны разряжения вниз по потоку.

Знание процессов (распределение ударно-волновой структуры внутри соплового раструба) на начальном участке несимметричной сверхзвуковой газовой струи способствует успешному решению таких задач, как разработка и проектирование сопловых управляющих блоков и наземных стендов для их испытаний.

В качестве исследуемой модели рассмотрим модель сопла Лавала с подвижной стенкой (рис. 1). Исходная геометрия модельного соплового блока будет определяться следующими параметрами: критическое сечение $d_{кр} = 30$ мм; угол полурасзора сопла $\alpha = 15^\circ$; длина стенки сопла $l_c = 330$ мм; предсопловая часть сформирована пластинами, расположенными под углом $\beta = 90^\circ$ друг к другу.

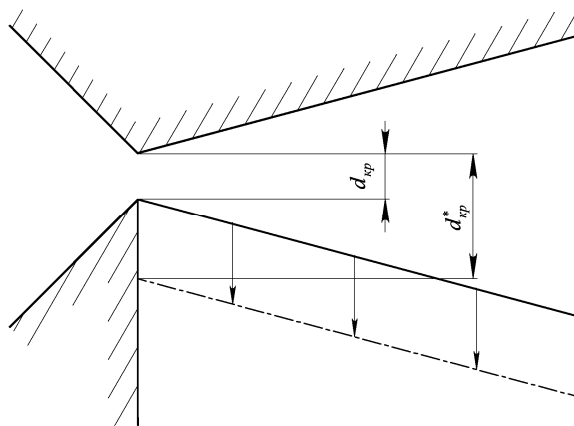


Рис. 1. Модель сопла Лавала с подвижной стенкой

Перекрытие критического сечения моделируется параллельным смещением стенки сопла (рис. 1). При этом вводится масштабный фактор $\mu = \frac{d_{кр}}{d_{кр}^*}$, позволяющий соотнести полученные результаты геометрических измерений с исходной геометрией модельного соплового блока.

Для исследования течения газа широкое применение находят методы моделирования. Наиболее выгодным с экономической точки зрения является метод моделирования газовых течений на основе гидрогазоанalogии. Этот метод позволяет смоделировать сверхзвуковое течение газа по тракту сопла, имеющего различные степени нерасчетности, и визуализировать картину распределения ударных волн на всех участках сверхзвуковой струи [2, 3, 4, 5].

Для реализации возможностей гидрогазоанalogии был изготовлен гидрлоток, основное назначение которого визуализация процессов течения газа на первоначальном участке сверхзвуковой струи (без наличия действительного газового потока).

На рабочее поле гидрлотка установлена модель сопла (рис. 2), основные геометрические параметры которого указаны на рис. 3, что позволяет визуализировать картину течения в несимметричной сверхзвуковой струе, вытекающей из сопла.

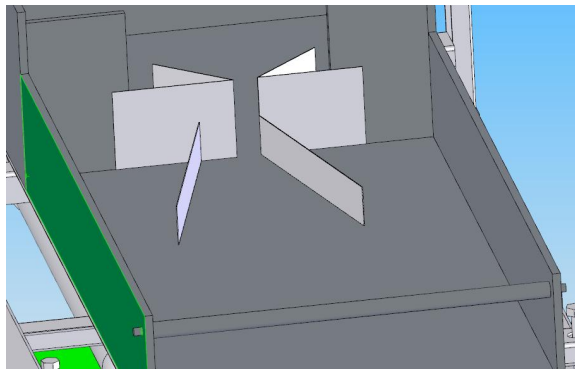


Рис. 2. Модель сопла, установленная в канал гидрлотка

На местоположение скачка уплотнения наибольшее воздействие оказывают перепад давлений торможения и окружающей среды, число Маха на срезе сопла, угол полураствора сопла [6] и степени перекрытия критического сечения.

Поскольку число Маха в точке отрыва меньше числа Маха на срезе сопла: $M_1 \leq M_a$, то $\frac{M_1}{M_a} \leq 1$. При $M_1 = M_a$ сопло работает в режиме предельной нерасчетности $N = N_{пр}$. Известно, что возможен случай, когда $M_a = 2M_1$, но т. к. $M_1 \geq 1$ ($M_1 = 1$ – скачок в критике, явление ненаблюдаемое, поскольку в этом случае скачок вырождается), следовательно, возьмем $M_a \geq 2$.

Возможности гидрлотка позволяют реализовать число Маха на срезе сопла в диапазоне: $2 \leq M_a \leq 5,5$.

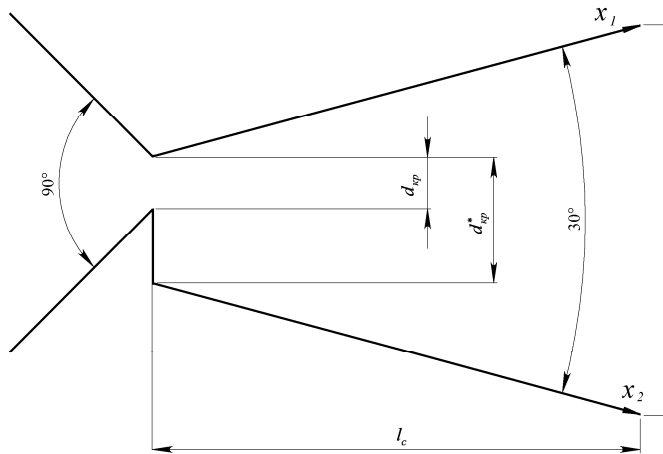


Рис. 3. Основные геометрические размеры

Учитывая, что масса жидкости, протекающая через критическое сечение сопла в единицу времени, равна массе жидкости, протекающей через срез сопла, будем иметь:

$$\rho_{\text{ж}} F_{\text{кр}} V_{\text{кр}} = \rho'_{\text{ж}} F_a V_a, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в критическом сечении; $F_{\text{кр}}$ – площадь критического сечения; $V_{\text{кр}}$ – скорость жидкости в критическом сечении; $\rho'_{\text{ж}}$ – плотность жидкости на срезе сопла; F_a – площадь среза сопла; V_a – скорость жидкости на срезе сопла.

Так как вода – несжимаемая жидкость, то это равенство примет вид

$$F_{\text{кр}} V_{\text{кр}} = F_a V_a \quad (2)$$

или

$$b_{\text{кр}} h_{\text{кр}} V_{\text{кр}} = b_a h_a V_a, \quad (3)$$

где b_a – диаметр среза сопла; $b_{\text{кр}}$ – диаметр критического сечения.

Из гидравлики известно, что

$$\begin{aligned} h_{\text{кр}} &= \frac{2}{3} h_0, \\ V_{\text{кр}} &= \sqrt{\frac{2}{3} g h_0}, \\ V_a &= \sqrt{2g(h_0 - h_a)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда следует:

$$\frac{V_a}{V_{\text{кр}}} = \sqrt{3 \left(1 - \frac{h_a}{h_0} \right)}; \quad (5)$$

после преобразований получаем:

$$B = \frac{b_a}{b_{кр}} = \frac{2}{3} \frac{h_0}{h_a} \sqrt{\frac{1}{3 \left(1 - \frac{h_a}{h_0}\right)}}, \quad (6)$$

где B – степень расширения сопла.

В методе газогидравлической аналогии аналогом числа Маха является число Фруда, т. е.

$$M = Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad \text{или} \quad M_a = Fr_a = \frac{V_a}{\sqrt{gh_a}}. \quad (7)$$

В результате

$$M_a = \sqrt{2 \left(\frac{h_0}{h_a} - 1 \right)}; \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{3} (M_a^2 - 2) \sqrt{\frac{M_a^2 - 2}{3(M_a^2 - 4)}}. \quad (9)$$

В ходе проведения эксперимента получены координаты точек отрыва скачков уплотнения от стенок соплового блока модельного сопла: $\bar{x}_1 = x_{1\mu}$; $\bar{x}_2 = x_{2\mu}$.

Учитывая, что перепад давлений, при котором происходит отрыв потока, в методе гидрогазоанalogии нам неизвестен, а местоположение скачков уплотнения можно определить визуально, будем планировать эксперимент так, чтобы перепад давлений был искомой величиной, которая зависит от числа Маха на срезе M_a , местоположения скачка уплотнения, которое однозначно определяется числом Маха в точке отрыва M_1 .

В результате будем иметь следующий эксперимент:

$$\left(\frac{h_0}{h_H} \right)^2 = \frac{P_0}{P_H} = N = f_1(\bar{\varepsilon}, \bar{x}_1), \quad \left(\frac{h_0}{h_H} \right)^2 = \frac{P_0}{P_H} = N = f_2(\bar{\varepsilon}, \bar{x}_2),$$

$$\text{где } \bar{\varepsilon} = \frac{d_{кр}}{d_{кр}^*}.$$

Матрица эксперимента будет иметь вид

h_0 , мм	$d_{кр i}^*$, мм										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	∞
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	∞
20	∞	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	∞	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30

Во время перекрытия критического сечения заслонкой происходит структурное изменение геометрии ударных волн внутри соплового блока в несколько последовательных этапов. На первом этапе при полностью открытом критическом сечении течение внутри соплового блока осесимметрично (рис. 4, а). На втором этапе (рис. 4, б) при перекрытии критического сечения у кромки заслонки возникает ламинарный отрыв, который, в свою очередь, отражается от стенки сопла и пересекает противоположный висячий скачок уплотнения. У стенки заслонки сразу появляется циркуляционная зона. По мере увеличения перекрытия критического сечения отраженная волна опускается до нижней точки диска Маха. На третьем этапе (рис. 4, в) ламинарный отрыв потока не касается стенки сопла, циркуляционную зону разделяет турбулентный отрыв, начинающийся от кромки заслонки. С увеличением перекрытия критического сечения турбулентный отрыв отделяется от стенки сопла и формирует размытую границу недорасширенной струи, а ламинарный отрыв формирует висячий скачок уплотнения (рис. 4, г). Таким образом, в процессе перекрытия критического сечения осесимметричная струя претерпевает ряд структурных изменений, в конце которого она становится с одной стороны недорасширенной, а с другой стороны – перерасширенной.

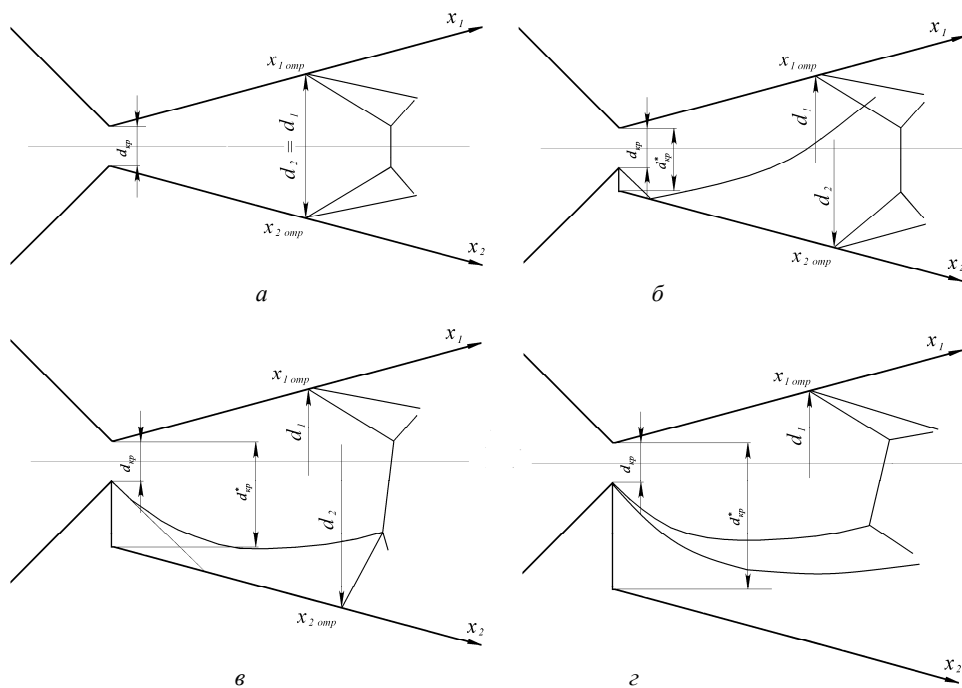


Рис. 4. Геометрия структуры потока внутри соплового блока

Анализ полученных результатов позволяет оценить динамику положения точек отрыва потока в плоскости симметрии от стенок внутри соплового блока с нетривиальным критическим сечением.

На рис. 5, а показан характер изменения расширения струи относительно левой стенки сопла и на рис. 5, б – от правой стенки сопла. На этом графике можно выра-

зять три характерные зоны: первая зона находится в области отношения полных давлений, находящихся от 4 до 8; вторая зона – от 8 до 10; третья зона – от 10 до 23.

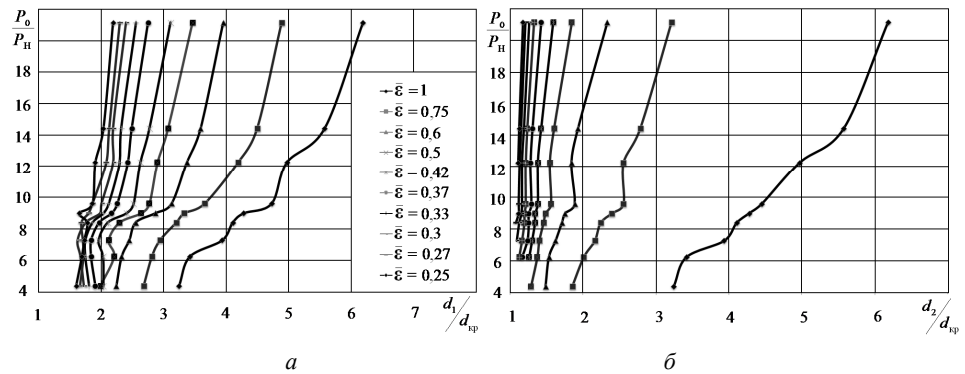


Рис. 5. Характер расширения струи

Первой области графиков (рис. 5) соответствует течение с присоединенной волной турбулентного отрыва течения к стенке сопла и отделенной волной ламинарного течения от нее, а при малых значениях перекрытия критического сечения – полный отрыв струи от стенки сопла. На второй области происходит объединение ламинарного и турбулентного отрывов при перекрытии критического сечения. Третьей области соответствует режим отражения ламинарного отрыва от стенки сопла.

Аналогично расширению струи ведет себя и значение числа Маха в точке отрыва от стенки сопла (рис. 6).

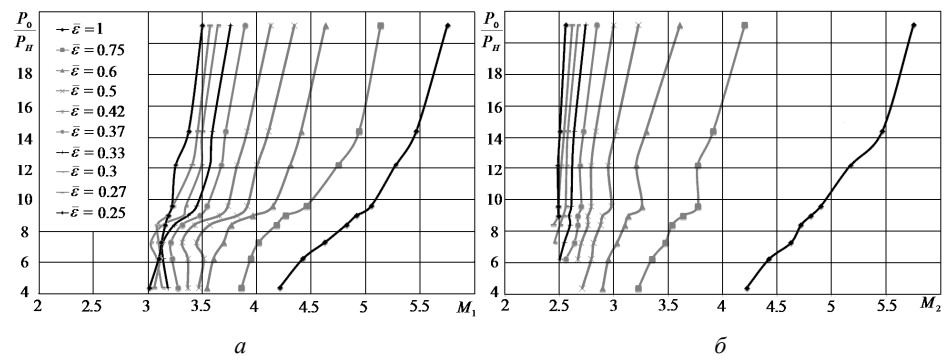


Рис. 6. Значения числа Маха в точках отрыва потока от стенки сопла

Таким образом, формирование геометрии отрывных зон внутри соплового блока с нетривиальным критическим сечением по мере перекрытия заслонки происходит в несколько фаз по вполне определенному сценарию.

Библиографические ссылки

1. Гребенкин В. И., Кузнецов Н. П., Черепов В. И. Силовые характеристики маршевых твердотопливных двигательных установок и двигателей специального назначения. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2003 – 356 с.

2. Виноградов Р. И., Жуковский М. И., Якубов И. Р. Газогидравлическая аналогия и ее практическое приложение. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. Патрашев А. Н., Кивако Л. А., Гожий С. И. Прикладная гидромеханика. – М. : Военгиз, 1970. – 683 с.
4. Сунцов Н. Н. Методы аналогий в аэрогидродинамике. – М. : Физматгиз, 1958. – С. 223–324.
5. Прикладная аэродинамика / Н. Ф. Краснов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1974. – 732 с.
6. Исследование метода гидрогазоанalogии для исследования первоначального участка сверхзвуковой струи / Н. П. Кузнецов [и др.] // Вестник ИжГТУ. – 2005. – № 4. – С. 25–29.

Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

N. P. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

R. A. Yurtikov, Izhevsk State Technical University

S. M. Solovjev, Izhevsk State Technical University

Use of Analog Modeling Method for Study of an Initial Phase of an Asymmetrical Supersonic Stream

The method of analog modeling for study of initial phase of the model of asymmetrical gas ultrasonic flow is presented.

Keywords: water channel, hydraulic gas dynamics analogy, supersonic stream

Получено: 11.11.11

УДК 539.3+534.1

В. Е. Лялин, доктор технических наук, профессор

В. П. Тарануха, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИСКОВ В УСТРОЙСТВАХ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрена математическая модель радиальных колебаний дисков в устройствах хранения информации. Предложен аналитический метод решения поставленной задачи, и на его основе получены полные и окончательные выражения радиальных колебаний диска для любого закона изменения угловой скорости основного вала устройства хранения данных.

Ключевые слова: устройства хранения данных, колебания диска

Устройства хранения данных (УХД) на дисках нашли широкое применение как внешние запоминающие устройства интеллектуальных платформ телекоммуникационных систем. Для успешного применения дисков в УХД большое значение имеет вопрос исследования их деформаций [1, 2, 3, 4].

В общем случае плоские колебания диска описываются следующей системой дифференциальных уравнений [5]: