

УДК 621.45.015.4:533.21

**Н. П. Кузнецов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. А. Николаев**, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Р. А. Юртиков**, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ПО КАНАЛУ СОПЛОВОГО БЛОКА ТИПА «К»\*

*Описывается численное моделирование течения рабочего тела по каналу соплового управляющего блока типа «К».*

**Ключевые слова:** сверхзвуковая несимметричная газовая струя, численные методы, Ansys, силовые характеристики, сопловой блок.

С появлением мощных расчетно-вычислительных комплексов стало возможно решение пространственных газодинамических задач, расчет параметров течения в дозвуковой и сверхзвуковой областях. В настоящее время широкое применение для моделирования вязкого течения однокомпонентного рабочего тела в сопловых блоках находят программные вычислительные комплексы Ansys CFX и Ansys Fluent, основанные на решении системы уравнений Навье – Стокса.

На сегодняшний день достаточно полно изучены процессы, протекающие в каналах ракетных двигателей, в соплах имеющих нетривиальную геометрию, разработаны методы прямой и обратной теории сопла.

Течения в сопловых блоках с нетривиальным критическим сечением в трансзвуковой области могут существенно отличаться от течений в блоках, имеющих классическую геометрию, что оказывает сильное влияние на формирование отрывной зоны в сверхзвуковой части сопла, в результате чего появляются дополнительные силы, действующие на блок в целом.

Для численного моделирования течения газовых потоков по сопловому блоку типа «К», конструкция которого рассмотрена в статье [1], был применен программный комплекс Ansys CFX. Расчетная схема, использовавшаяся для моделирования течения, показана на рис. 1. Расчетная область представляет собой усеченный по оси симметрии сопловой блок «К». Поскольку в данной конструкции соплового блока в рабочем режиме всегда находится только одно из двух сопел, второе сопло в расчетную область не вошло, также при расчете не учитывались утечки рабочего тела.

Для моделирования течения газовых потоков по сопловому сопловому блоку построено десять моделей с различной степенью открытия критического сечения, которая изменялась с шагом 10 % для каждой последующей модели соплового блока, от 10 % до полностью открытого критического сечения. Давление в подводящей магистрали изменялось в пределах от 1 до 6 МПа с шагом 1 МПа.

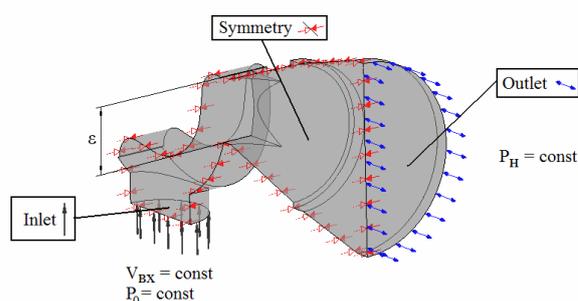


Рис. 1. Расчетная область модели соплового блока типа «К»

На рис. 2 представлены некоторые результаты численного моделирования распределения чисел Маха по плоскости симметрии. Давление в подводящей магистрали изменялось от 1 до 6 МПа с шагом 1 МПа, степень открытия критического сечения составляла 30 %.

Известно, что из-за несимметричности течения газа по выхлопному сопловому блоку выходная силовая характеристика соплового блока имеет три составляющие:  $R_x$ , Н, боковая сила  $R_{бок}$ , Н, и управляющий момент  $M$ , Н·м,  $R_x \cdot \delta - R_{бок} \cdot l$ .

Расчетная схема соплового блока с регулируемым критическим сечением при отсутствии разворота потока в зоне критического сечения изображена на рис. 3.

Равнодействующей вектору тяги является геометрическая сумма векторов осевой и боковой силы:

$$R = \sqrt{(R_{x1} + R_{x2})^2 + R_{бок}^2}. \quad (1)$$

Тогда управляющий момент, создаваемый сопловым блоком, будет равен

$$M = RH. \quad (2)$$

По всей поверхности соплового блока в процессе истечения рабочего тела действует статическое давление. Интегральная характеристика распределения статического давления будет определять направление

и величину вектора тяги, действующей на блок. Проекция этого вектора на ось, совпадающую с геометрической осью сопла, даст осевую составляющую

(рис. 4), а на ось, перпендикулярную оси сопла и лежащую в плоскости симметрии соплового блока, – боковую составляющую вектора тяги (рис. 5).

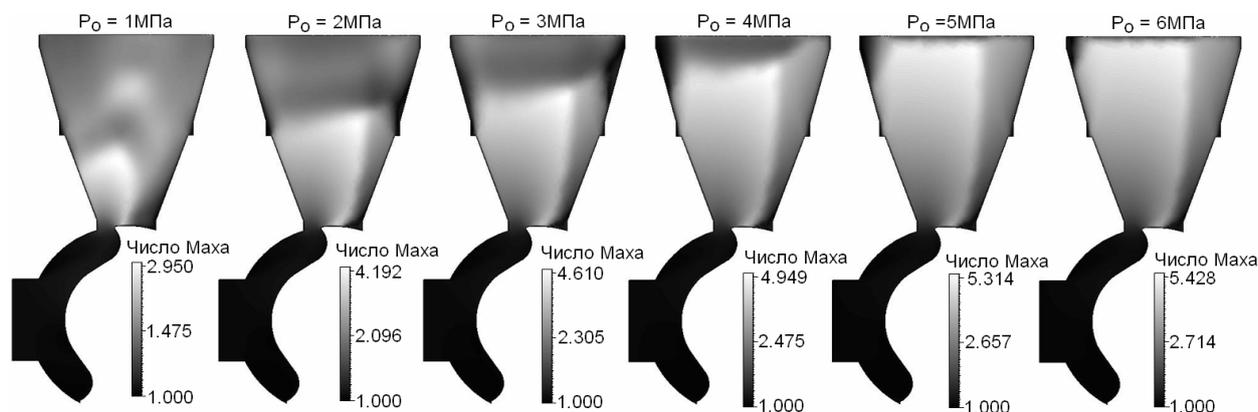


Рис. 2. Распределение числа Маха по сопловому блоку,  $\varepsilon = 30\%$

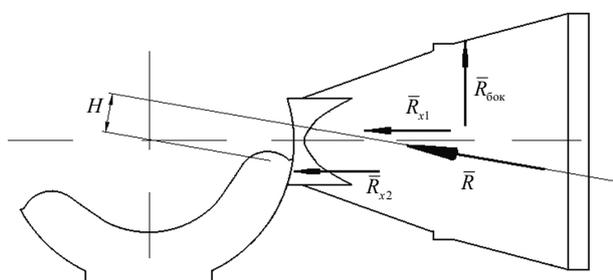


Рис. 3. Расчетная схема соплового раструба с регулируемым критическим сечением [1]

На рис. 6 представлены основные силовые характеристики соплового управляющего блока типа «К». Значения осевой силы тяги, боковой силы тяги, управляющего момента и угла отклонения вектора тяги от оси сопла, полученные с помощью моделирования в программном комплексе Ansys CFX, показаны на рис. 6.

Для различных давлений в подводящей магистрали осевая сила тяги в зависимости от степени открытия проходного сечения изменяется линейно, но при достижении 70 % открытия критического сечения, происходит уменьшение интенсивности роста осевой силы тяги.

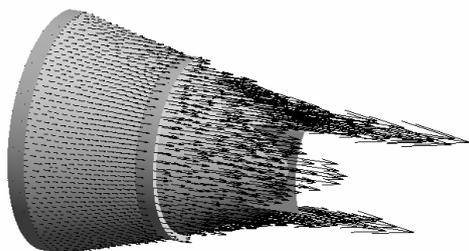


Рис. 4. Осевая проекция сил, действующих на сопловой блок

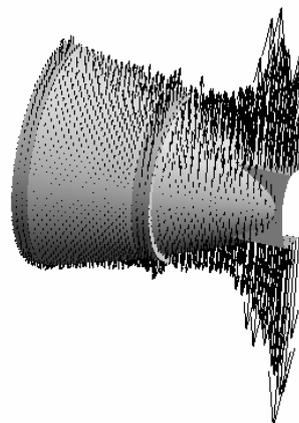


Рис. 5. Боковая проекция сил, действующих на сопловой блок

Характеры изменения боковой силы тяги и управляющего момента схожи, оба параметра имеют характерные зоны. Положительное значение обоих параметров характеризуется тем, что каждому определенному значению соответствует определенное значение давления в подводящей магистрали и степени открытия критического сечения. Отличительной чертой является то, что переход для всех значений давления в предсопловом объеме на положительное значение для боковой силы достигается при значении перекрытия

критического сечения от 56 до 69 %, тогда как управляющий момент достигает положительных значений в пределах от 56 до 73 %.

Угол наклона вектора тяги к геометрической оси раструба соплового блока изменяется в пределах 20 градусов. Минимальное значение, равное  $-10,8^\circ$ , достигается при значении давления в подводящей магистрали 6 МПа и 20%-м открытии критического сечения, максимальное  $11,3^\circ$  – при давлении 2 МПа и полностью открытом критическом сечении.

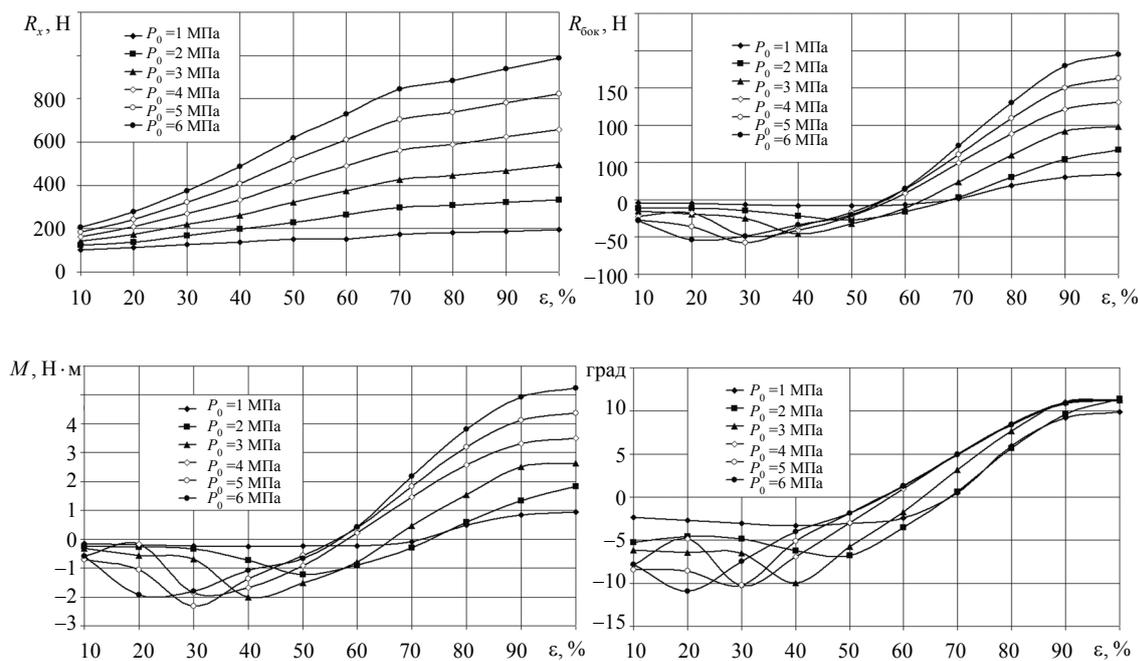


Рис. 6. Силовые характеристики соплового управляющего блока

По мере достижения положительных значений угла наклона вектора тяги к оси соплового блока можно выделить характерные области:

1-я – диапазон давлений изменяется в пределах от 1 до 2 МПа, величины углов имеют очень близкие значения в соответствии со степенью открытия критического сечения и располагаются вдоль некоторой характеристики;

2-я – от 2 до 3 МПа – переходный режим от первой характеристики ко второй;

3-я – от 3 до 6 МПа – значения углов наклона вектора тяги к геометрической оси раструба также имеют близкие значения для соответствующих значений перекрытия критического сечения и располагаются вдоль некоторой кривой.

Отрицательные значения угла наклона можно разделить на две области:

1-я – область, ограниченная кривой 6 МПа, начинающаяся от 20%-го значения открытия критического сечения. В этой области характерно дублирование значений угла наклона вектора тяги для различных

показателей давления в подводящей магистрали и степени открытия критического сечения.

2-я – область, ограниченная кривой 6 МПа и начинающаяся от 10%-го перекрытия критического сечения. В этой области для каждой комбинации давления в подводящей магистрали и степени открытия критического сечения соответствует определенное значение угла наклона вектора тяги к геометрической оси раструба сопла управляющего блока типа «К».

#### Библиографические ссылки

1. Кузнецов Н. П., Юртиков Р. А. Исследование начального участка сверхзвуковой несимметричной газовой струи (на примере соплового блока типа «К») // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 3(55). – С. .
2. Гребенкин В. И., Кузнецов Н. П., Черепов В. И. Силовые характеристики маршевых твердотопливных двигателей установок и двигателей специального назначения. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2003. – 356 с.
3. Черепов В. И., Кузнецов Н. П., Гребенкин В. И. Идентификация силовых характеристик объектов машиностроения. – М. ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 200 с.

N. P. Kuznetsov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
V. A. Nikolaev, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
R. A. Yurtikov, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Numerical Modeling of Gas Flow in the Channel of Type "K" Nozzle Block

Numerical modeling of the operating body flow on the channel of the type "K" nozzle control block is described.

**Key words:** supersonic asymmetrical gas stream, numerical methods, ANSYS software, power characteristics, nozzle block.