

УДК: 533.697.4

А. Н. Миронов, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
 К. В. Сермягин, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В НЕСИММЕТРИЧНОМ СОПЛОВИ БЛОКЕ

*Рассматриваются вопросы определения управляющих сил, возникающих при истечении газа из несимметричного соплового блока. Излагаются результаты применения методики для численного расчета течения газа в несимметричном сопловом блоке.*

**Ключевые слова:** несимметричный сопловый блок, математическое моделирование, управляющая сила.

В современных летательных аппаратах находят применение различные несимметричные сопловые блоки. Это сопла управляющих, тормозных и других двигателей специального назначения. От правильного определения управляющих сил, создаваемых такими сопловыми блоками, определения особенностей структуры течения газа зависит работоспособность и надежность летательного аппарата. Задачи по определению управляющих сил в несимметричных сопловых блоках ставились, например, в работах [1, 2]. В силу ограниченности ресурсов вычислительной техники их решение осуществлялось как правило с использованием полуэмпирических подходов. Современная вычислительная техника позволяет решать сложные трехмерные задачи газовой динамики при минимуме принимаемых допущений.

Ниже приводятся результаты решения системы газодинамических уравнений в цилиндрической системе координат. При моделировании приняты следующие основные допущения:

- продукты сгорания принимаются совершенным и неизменным по составу газом;
- эффекты вязкости и теплопроводности в решаемой задаче не учитываются.

Решение выполнялось нестационарным методом крупных частиц, разработанным О. М. Белоцерковским и Ю. М. Давыдовым [3] с модификациями и дополнениями, предложенными в [4, 5].

Решена задача о течении газа в кососрезанном сопловом блоке. Полученные в результате расчетов параметры газа позволяют вычислить значение боковой силы. Значения осевой и боковой (управляющей) составляющей силы тяги определяются, соответственно, по следующим формулам:

$$P = \int_{F_{kr}} \dot{m} u_{kr} d\dot{m} + \int_{F_{kr}} p dF - p_n \int_{F_{ax}} dF + \int_{F_{cx}} p dF; \quad (1)$$

$$P_{bok} = -p_n \int_{F_{ay}} dF + \int_{F_{cy}} p dF. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) приняты обозначения:  $P$ ,  $P_{bok}$  – соответственно, осевая и боковая составляющие силы тяги;  $F$  – площадь;  $\dot{m}$  – секундный расход;  $p$  – давление;  $u_{kr}$  – скорость газа в критическом сечении; индексы  $kr$ ,  $a$ ,  $c$  относятся, соответственно, к критическому сечению, плоскости среза сопла и боковой поверхности сопла; индексы  $x$  и  $y$  обозначают проекции этих площадей на поверхности  $XU$  и  $XZ$  соответственно в декартовой системе координат, если плоскостью симметрии является плоскость  $YZ$ . На практике принято определять относительную боковую силу как отношение боковой управляющей силы к силе тяги двигателя.

Исследованы параметры газодинамических потоков в кососрезанном сопловом блоке с частичным перекрытием критического сечения, схема которого представлена на рис. 1.

Для решения данной задачи принято дополнительное допущение, что регулирование площади критического сечения происходит за счет «ступеньки» в критическом сечении, которая перекрывает часть его площади. Таким образом, в расчете не учитывалась несимметричность параметров газа на входе в сопло.

На рис. 2 представлены, соответственно, поле давления и изобары в продольном сечении канала (минимальное сечение канала открыто наполовину, давление в ресивере равно восьмидесяти атмосферам). Канал перекрывается снизу.

Для рассматриваемого соплового блока получены зависимости давления по поперечным сечениям, которые представлены на рис. 3.

Из рис. 3 и 4 видно, что ударные волны образуются в местах изменения геометрии канала на входе в сопло и в местах перехода конической части сопла в цилиндрическую.

На рис. 4 и 5 показаны распределение чисел Маха и температуры в продольном сечении соплового блока.

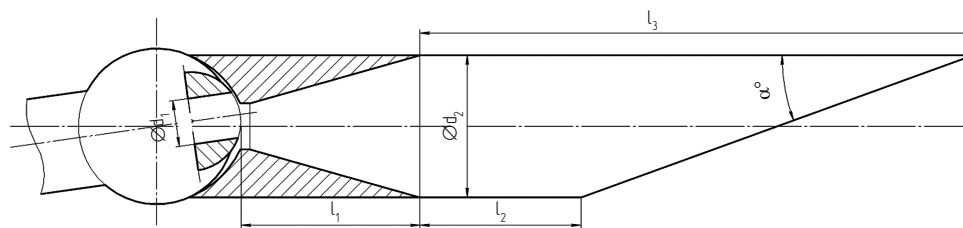


Рис. 1. Схема кососрезанного соплового блока с частичным перекрытием критического сечения

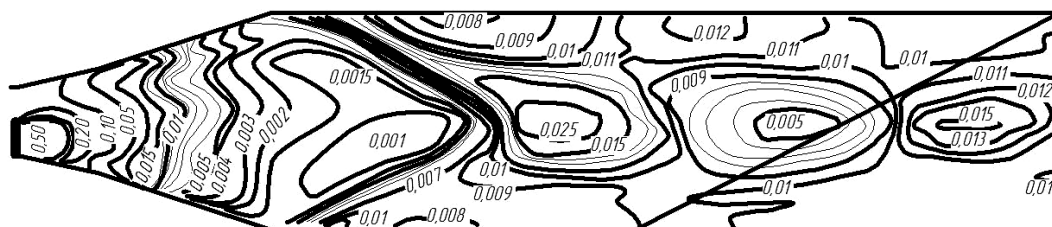


Рис. 2. Изобары в кососрезанном сопловом блоке с частичным перекрытием критического сечения (значения в МПа)

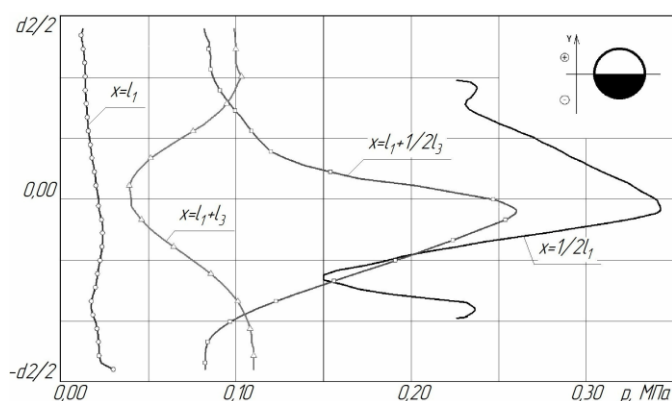


Рис. 3. Изменение давления в различных сечениях соплового блока:  $l_1, l_3, d_2$  – длины и диаметр в соответствии со схемой на рис. 1



Рис. 4. Распределение чисел Маха в продольном сечении соплового блока

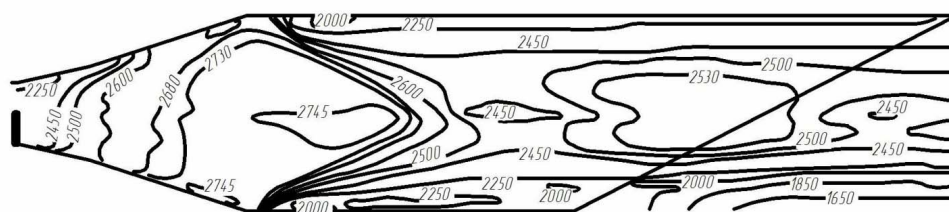


Рис. 5. Температура в продольном сечении соплового блока

На рис. 6 показано изменение относительной боковой силы в зависимости от степени перекрытия сопла при различных давлениях в ресивере. Степень перекрытия критического сечения изменяется от единицы до двух десятых. Единица соответствует полно-

стью открытому критическому сечению, а  $\alpha = 0,2$  указывает, что площадь критического сечения открыта лишь на двадцать процентов.

Из графиков на рис. 2–6 видно, что течение в несимметричном сопловом блоке, схема которого при-

ведена на рис. 2, имеет сложную волновую структуру с выраженной трехмерностью течения, что оправдывает применение трехмерных математических моделей.

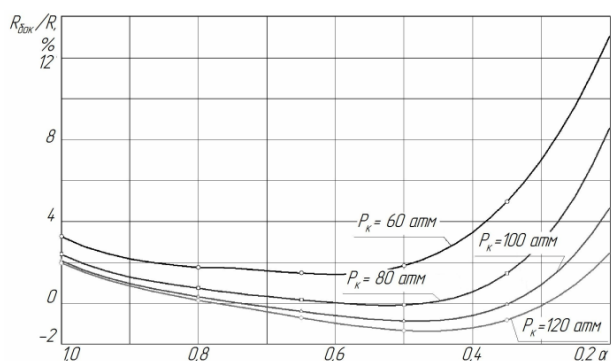


Рис. 6. Изменение относительной боковой силы в зависимости от степени перекрытия сопла:  $P_k$  – давление в ресивере согласно схеме на рис. 1;  $\alpha$  – степень открытия сопла;  $R_{бок}/R$  – относительная сила тяги

Предложенная методика может быть полезна при проектировании и отработке несимметричных сопловых блоков и проточных каналов ракетных двигателей специального назначения, а также при анализе структуры течения продуктов сгорания в соплах и каналах.

#### Библиографические ссылки

1. Пирумов У. Г., Росляков Г. С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. литер., 1990. – 368 с.
2. Ткаченко А. С. Численное исследование тяговых характеристик и структура пространственных течений в соплах // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1981. – № 5. – С. 168–172.
3. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 391 с.
4. Численный эксперимент в теории РДТТ / А. М. Липанов [и др.]. – Екатеринбург: Наука, 1994. – 302 с.
5. Алиев А. В., Блинов Д. С. Решение газодинамических задач в областях сложной формы с использованием конечно-объемных алгоритмов метода крупных частиц // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 1(41). – С. 151–154.

A. N. Mironov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

K. V. Sermyagin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Numerical Investigation of Gas Flow in Asymmetric Nozzle Block

Problems of defining the control forces caused by the gas flow out of the asymmetrical nozzle block are considered. Results of applying the numerical method of gas flow calculation for the asymmetrical nozzle block are presented.

**Key words:** asymmetric nozzle block, mathematical modeling, control force.

УДК 539.319

М. А. Осипенко, кандидат физико-математических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОГО ИЗГИБА ДВУХЛИСТОВОЙ РЕССОРЫ С ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ КОРОТКОГО ЛИСТА

Построено аналитическое решение контактной задачи об изгибе двухлистовой рессоры с параболическим профилем короткого листа и постоянным профилем длинного листа. Установлено, что существуют три возможных варианта картины контакта: контакт в одной точке на конце короткого листа, контакт по всей длине короткого листа и контакт по отрезку короткого листа. Полученное решение позволяет найти напряжения в листах и коэффициент использования материала.

**Ключевые слова:** двухлистовая рессора, изгиб, параболический профиль, контактная задача, аналитическое решение.

Листовые рессоры широко используются в качестве упругих элементов подвесок автомобилей [1]. Известно также их использование в протезах стопы [2]. Поэтому задачи расчета статического изгиба таких рессор являются актуальными. Несмотря на то, что эти задачи изучаются уже более 150 лет [3], не существует общего метода построения их аналитических решений, а имеется лишь весьма небольшой набор таких решений для отдельных задач [1–8]. Причина в том, что даже при ис-

пользовании простейшей теории изгиба одного листа задача о совместном изгибе листов является контактной; аналитические решения таких задач еще мало изучены.

Целью настоящей статьи является построение аналитического решения задачи изгиба двухлистовой рессоры с коротким листом переменной толщины (параболического профиля) и длинным листом постоянной толщины. Это построение увеличивает вышеупомянутый набор решений и, возможно, явля-