

УДК 533: 629.76

## **Формирование вихревых структур в каналах с массоподводом и их взаимодействие с поверхностями в РДТТ**

**Б.Я. Бендерский, А.А. Чернова**

*Ижевский государственный технический университет  
им. М.Т. Калашикова*

E-mail: alicaaa@gmail.com

Рассматриваются топологические особенности структуры потока продуктов сгорания в проточных трактах с различными формами поперечных сечений каналов в энергетических установках. Результаты математического моделирования внутренней газодинамики проточных трактов энергетических установок сопоставляются с данными физического эксперимента.

**Ключевые слова:** газодинамика, топология, особые точки, камера сгорания, энергетическая установка.

В настоящее время актуальность численного моделирования внутрикамерных процессов не подвергается сомнению, этот метод позволяет исследовать процессы, протекающие в труднодоступных каналах и объемах, и существенным образом сокращает сроки разработки новых энергетических установок. Однако такой подход требует обязательной верификации результатов доступными экспериментальными данными.

Необходимо отметить, что за последнее десятилетие существования СССР различными научными школами и исследователями накоплено достаточное количество экспериментальных материалов по исследованию течений продуктов сгорания (ПС) в проточных трактах энергетических установок. Опубликованные работы содержат как подробное описание используемого стендового оборудования [1], так и визуализацию топологических особенностей потока. Полученные результаты удобно использовать в качестве тестового материала [2].

Стоит отметить, что детальный анализ топологии потока позволяет дать рекомендации о наиболее теплонагруженных элементах конструкции еще до проведения стендовых испытаний. А методы топологических исследований являются одним из востребованных инструментов валидации численных методов и расчетных схем.

В работе рассматриваются топологические особенности потока продуктов сгорания в проточных трактах энергетических установок. Все расчеты выполнены в программе ANSYS CFX (Academic research CFD Pad App, лицензия инв. № 1000014044 от 2007г.). Полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

## 1. Течение газа в каналах

Рассматривается стационарное пространственное турбулентное течение сжимаемого газа в каналах с различными формами поперечного сечения (канально-щелевой и звездообразной [1, 3, 4]) энергетической установки (ЭУ), которое описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}) &= 0, \\ \partial\rho\mathbf{U}/\partial t + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) &= -\nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \\ \partial\rho E/\partial t + \nabla \cdot (\rho E\mathbf{U}) &= -p(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} - \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \mathbf{U}), \\ p &= \rho RT,\end{aligned}$$

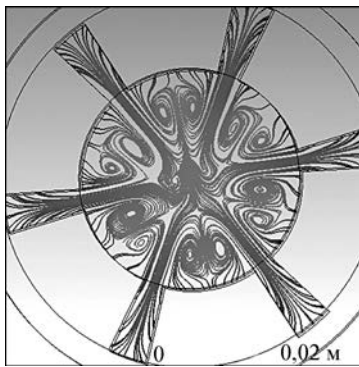
где  $\rho$  — плотность газа,  $p$  — давление,  $\mathbf{U}$  — вектор скорости,  $\boldsymbol{\sigma} = -\mu(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T) + 2/3\mu(\nabla\mathbf{U})\mathbf{I}$  — тензор вязких напряжений,  $E = U^2/2 + c_v T$  — полная энергия,  $T$  — температура,  $\mathbf{q}$  — вектор теплового потока,  $\mu$  — динамическая вязкость,  $\mathbf{I}$  — инвариант первого порядка. Для замыкания системы уравнений (1), с учетом рекомендаций [5], используется модель турбулентности RNG.

Граничные условия определены следующим образом. На входе задаются расход газа  $G$  и начальная интенсивность турбулентности  $Tu$ , на поверхности вдува — распределенный вдув (скорость  $U_0$ ), на стенках камеры и бронированных поверхностях (межлучевое и межщелевое пространство, а также стенки цилиндрического канала) — условия прилипания. Параметрам потока во входном сечении присваиваются значения:  $T_a = 300$  К,  $G_a = 1-20$  кг/с,  $Tu_a = 5\%$ ; на поверхности вдува:  $T_k = 300$  К,  $U_k = 0-10$  м/с,  $Tu_k = 5\%$ , показатель адиабаты газа (воздуха)  $k = 1,4$ , соотношение расходов во входном сечении и на поверхностях вдува определялось коэффициентом  $K_g = G_a/G_k$ .

### Канал со звездообразной формой поперечного сечения

Рассмотрим особенности структуры потока газа в канале со звездообразной формой поперечного сечения при симметричном расположении соплового блока,  $K_g = 1/7$ . Поток газа, поступающие из соседних лучей звезды, взаимодействуют как между собой, так и с канальным потоком, образуя вблизи его продольной оси слой смешения. Поток, вытекающий из луча, оттесняется центральным потоком, заполняет межлучевое пространство, где, взаимодействуя с потоком из соседнего луча, образует устойчивые [6–8] парные вихревые структуры (рис. 1).

Циркуляционные зоны в межлучевом пространстве симметричны, однако при внесении возмущений (например, при линейном или угловом смещении оси утопленного сопла [9]) симметрия нарушается и наблюдается укрупнение вихревых структур [1, 9].



### Канал с попарно симметричными щелевыми компенсаторами

В отличие от случая звездообразного канала, поток из щелевых компенсаторов, взаимодействуя с центральным канальным потоком (рис. 2а), разделяется и, оттесненный последним, разворачивается вблизи поверхностей канала, образуя пристеночные вихревые структуры (рис. 2б). Развитые парные пристеночные вихри поступают в предсопловой объем (рис. 2с).

Рис. 1. Линии тока в поперечном сечении канала звездообразной формы.

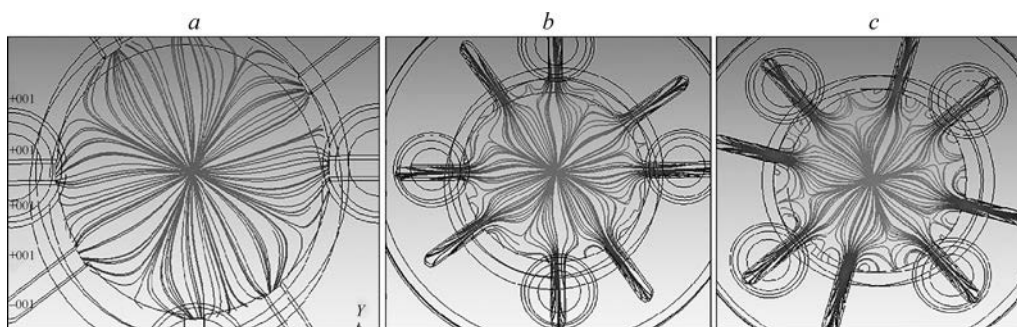


Рис. 2. Структура потока.

$a$  — в цилиндрической части канала,  $b$  — в начале щелевой части канала,  $c$  — на входе в предсопловой объем.

## 2. Структура потока в предсопловом объеме энергетической установки

Известно [5], что одной из областей энергетической установки, где реализуются трехмерные эффекты, является предсопловой объем. Трехмерность течения в предсопловом объеме обусловлена как его геометрическими особенностями (формой крышек и сопловых блоков), так и газодинамической неустойчивостью потока. Сформировавшиеся в каналах энергетической установки парные вихревые структуры, попадая в предсопловой объем, взаимодействуют как с поверхностями соплового дна, так и с торцевой непроницаемой поверхностью заряда. Следы взаимодействия являются особые точки и линии.

### *Взаимодействие с торцевыми поверхностями*

Как было показано выше, взаимодействие потоков из щелевых компенсаторов с каналным приводит к образованию вблизи непроницаемых стенок цилиндрического канала (рис. 2, 3) парных вихревых структур, поступающих в предсопловой объем. Ввиду того, что оси симметрии сопел и щелевых компенсаторов не совпадают, происходит разворот поступающего газа. При этом часть продуктов сгорания вытекает непосредственно через сопла. Разворачивающийся поток вторично взаимодействует с поступающими из канала вихревыми структурами, образуя пространственные циркуляционные области, следы которых в виде предельных линий тока можно наблюдать вблизи бронированной поверхности торца канала.

Анализ предельных линий тока вблизи торцевой поверхности показывает, что положение узловых точек в межщелевом пространстве вблизи стенок камеры совпадает с поперечной осью  $l$  симметрии парных вихрей в канале, а линии стекания  $L_s$  ориентированы на не совпадающие с расположением сопел щели канала (рис. 3).

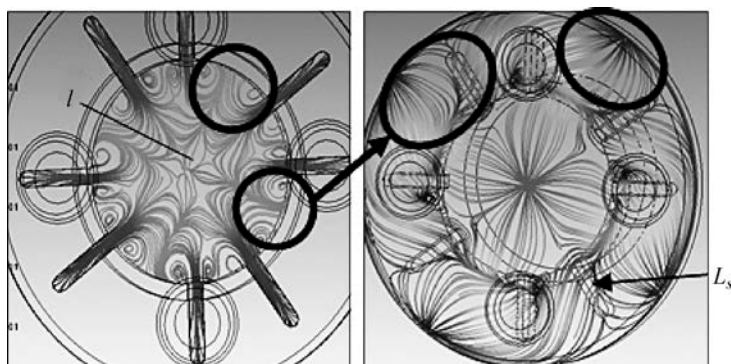


Рис. 3. Топология потока в канале и вблизи торца.

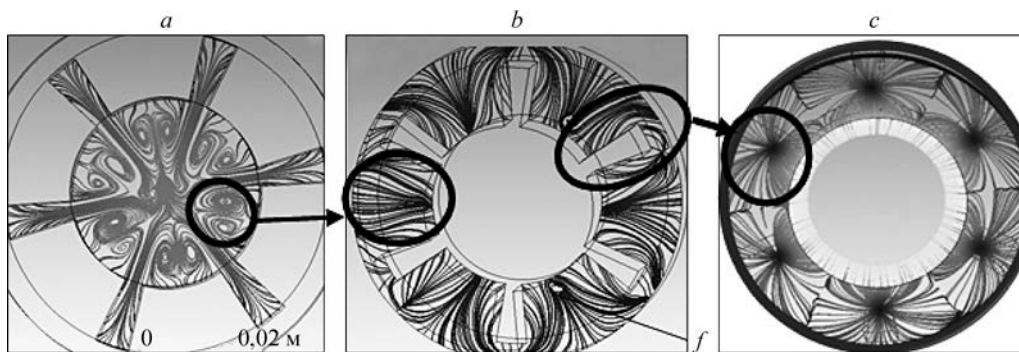


Рис. 4. Топология потока.

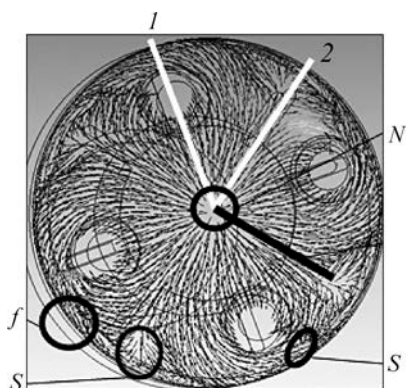
*a* — парные вихри между лучей звезды в канале, *b* — предельные линии тока вблизи торцевой поверхности, *c* — предельные линии тока вблизи входной части утолщенного сопла.

Рассмотрим течение в предсопловом объеме ЭУ со звездообразным каналом и утолщенным соплом. Часть потока, поступающего из канала, вытекает через сопло, остальной поток разворачивается в предсопловом объеме. Взаимодействие потока, поступающего из центрального канала (рис. 4*a*), с надсопловым потоком приводит к образованию вихрей вблизи входной поверхности утолщенного сопла (рис. 4*b*, 4*c*) и локальных циркуляционных зон вблизи бронированного торца и системы.

На картине предельных линий тока вблизи торца звездообразного канала, в отличие от их распределения в случае канально-щелевого сечения, положение линий растекания совпадает с поперечными осями симметрии межлучевых парных вихрей (рис. 4*c*), а выявленные в межщелевом пространстве точки фокуса *f* находятся вблизи как линий растекания, так и кромки цилиндрического канала.

#### **Взаимодействие с поверхностями многосопловой крышки и утолщенного соплового блока**

В предсопловом объеме ЭУ с попарно щелевой формой поперечного сечения канала поток, поступающий из щелевых пропилов, разворачивается против потока в межсопловом пространстве, образуя циркуляционные зоны в зазоре между бронированным торцом канала и сопловым дном, и поступает в сопло. Картина предельных линий тока на поверхности соплового дна (рис. 5) характеризуется наличием четырех линий растекания (*L*) и восьми линий стекания, образующих «седловые» точки (*S*). Анализ предельных линий тока на сопловом дне выявил «седловые» точки, расположенные в периферийной зоне крышки, и «узловые» (*N*) точки в области входа потока в сопло.



Зафиксировано образование узловой точки слияния (*N*), находящейся в центре соплового дна (на оси симметрии), являющейся, согласно распределению газодинамических параметров [4], точкой торможения. В межсопловой зоне при развороте потока происходит образование узловых точек типа «фокуса» (*f*). Показано, что полученные особые точки и линии удовлетворяет топологическому закону Деви–Лайтхилла [10].

Рис. 5. Предельные линии тока на поверхности соплового дна канально-щелевой ЭУ.

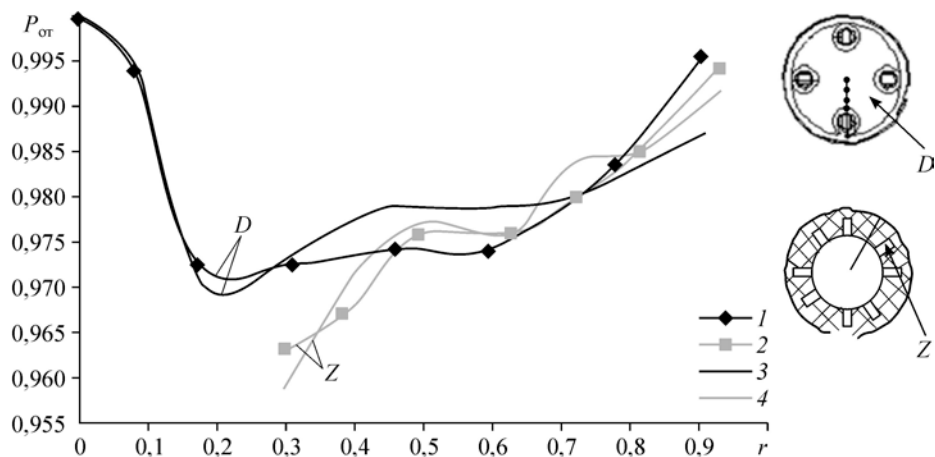


Рис. 6. Распределение относительного давления по поверхностям соплового дна и торца заряда.

*D* — дно сопловой крышки, *Z* — поверхность торца заряда; эксперимент (1) и расчет (3) на поверхности соплового дна, эксперимент (2) и расчет (4) на торце заряда.

Кроме того, выявлено, что поток в дозвуковой части сопла, как и в эксперименте [8], является закрученным.

Проведенное сопоставление расчетного и экспериментального [1, 11] распределений относительного давления  $P_{от} = P / P_0$  (рис. 6) по поверхности соплового дна (рис. 5, линия 1) и торца щелевого заряда (рис. 5, линия 2) показало хорошее качественное и количественное совпадение экспериментальных и расчетных данных (максимальная относительная погрешность 0,87 %).

В ЭУ с утопленным соплом взаимодействие потоков, вытекающих из центрального канала (звездообразного) и надсопловой зазора, показано на рис. 7. Поток, поступающий из центрального канала, взаимодействует со входной частью сопла, оттесняет надсопловой поток из кольцевого зазора (рис. 7а).

В области взаимодействия канального и надсопловых потоков образуется точка растекания. На рис. 7, 8 представлена структура предельных линий тока на входной части утопленного соплового блока. Структура предельных линий тока на входной поверхности сопла (рис. 7б) характеризуется наличием шести точек торможения, соответствующих положению лучей “звезды”, и шести седловых точек, что указывает на наличие вихревых структур у входной поверхности сопла. Рассмотрим более подробно структуру предельных линий тока вблизи одной из выявленных точек торможения. На рис. 8а, 8б видны области отрыва потока и образования подковообразных вихрей, кроме того, на рис. 8а также виден путь проникновения в сопло надсоплового потока (между зонами). На рис. 8 вблизи верхней кромки между линиями стекания видны следы разворота потока.

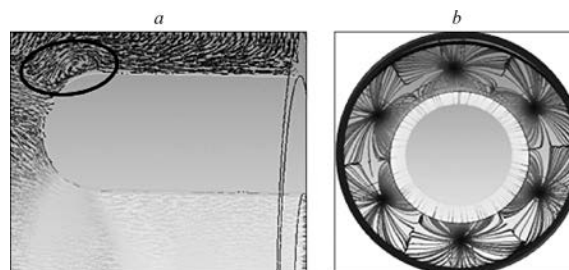


Рис. 7. Структура потока в околосопловом пространстве. *a* — надсопловой зазор, *b* — входная часть утопленного сопла.

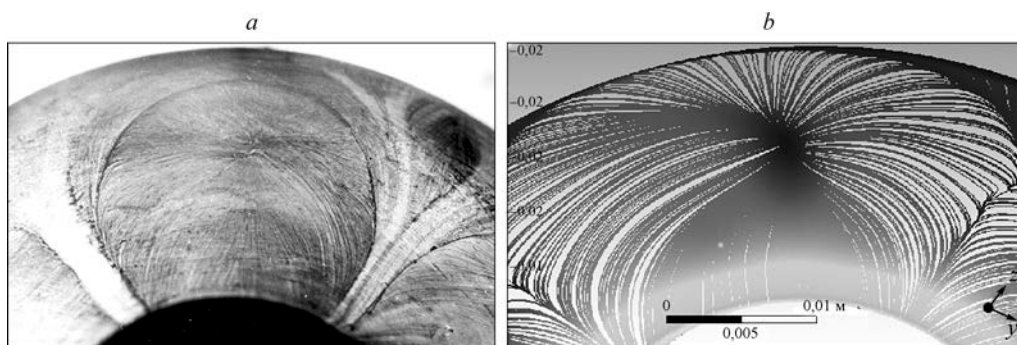


Рис. 8. Предельные линии тока вблизи входной поверхности утолщенного соплового блока. Экспериментальные (а) и расчетные (б) данные.

Подробная валидация результатов численных расчетов с экспериментальными данными [1] приводится в работах [9, 12] и подтверждает адекватность используемых расчетных схем. А сравнение различных программных продуктов между собой [9, 11, 12] доказывает достоверность полученных результатов.

### Заключение

Выявлена топология потока в каналах различной формы поперечного сечения в ЭУ с использованием численного моделирования, подтвержденная результатами физического эксперимента. Локальные топологические особенности потока могут быть учтены на этапе проектирования проточных трактов ЭУ.

### Список литературы

1. Савельев С.К., Емельянов В.Н., Бендерский Б.Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. СПб. Недра, 2007. 267 с.
2. Бендерский Б.Я., Тенев В.А. Пространственные дозвуковые течения в областях со сложной геометрией // Математическое моделирование. 2001. Т. 13, № 8. С. 121–127.
3. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 222 с.
4. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Чернова А.А. Моделирование внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2011. № 1. С. 31–34.
5. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
6. Зайковский В.Н. Инженерный метод расчета давления на внутренней поверхности поворотного сопла // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 2. С. 123–127.
7. Зайковский В.Н., Меламед Б.М. Экспериментальное исследование теплообмена в дозвуковом проточном тракте поворотных сопел РДТТ // III Междун. школа-семинар «Нестационарное горение и внутренняя баллистика». СПб. С. 112–114.
8. Кураев А.А., Ларичкин В.В., Саленко С.Д. Избранные главы механики жидкости и газа: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 140 с.
9. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Тенев В.А., Чернова А.А. Особенности моделирования внутрикамерных процессов энергоустановок, оснащенных утолщенным соплом // Космонавтика и ракетостроение. 2012. Т. 66, № 1. С. 156–161.
10. Topological fluid mechanics: proceedings of the IUIAM Symp., Cambridge UK, 13–18 August, 1989 / Ed. by H.K. Moffart, A.Tsinober. 783 p.
11. Чернова А.А. Пространственная газодинамика и теплообмен в предсопловом объеме ракетных двигателей твердого топлива: дисс. ... канд. техн. наук: защищена 20.01.2012; утв. 31.08.2012. Ин-т прикладной механики УрО РАН. Ижевск, 2011. 163 с.
12. Бендерский Б.Я., Тенев В.А. Экспериментально-численное исследование течений в осесимметричных каналах сложной формы с вдувом // Изв. РАН, МЖГ. 2001. № 2. С. 184–188.

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2014 г.