

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. Калашникова*

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:

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

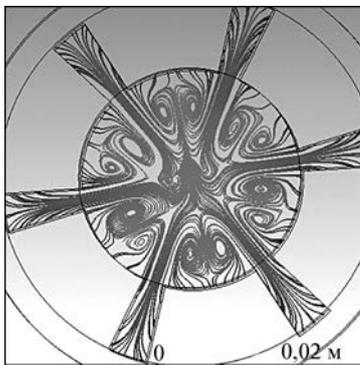
где ρ — плотность газа, p — давление, \mathbf{U} — вектор скорости, $\boldsymbol{\sigma} = -\mu(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T) + 2/3\mu(\nabla\mathbf{U})\mathbf{I}$ — тензор вязких напряжений, $E = U^2/2 + c_v T$ — полная энергия, T — температура, \mathbf{q} — вектор теплового потока, μ — динамическая 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, $G_a = 1\text{--}20$ кг/с, $Tu_a = 5\%$; на поверхности вдува: $T_k = 300$ К, $U_k = 0\text{--}10$ 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.

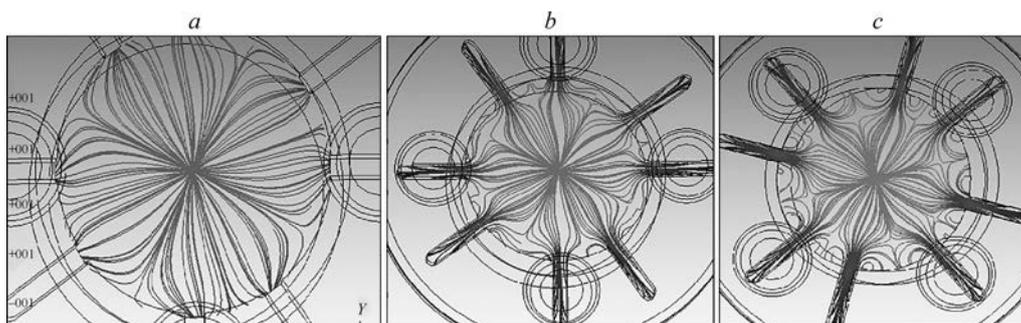


Рис. 2. Структура потока.

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).

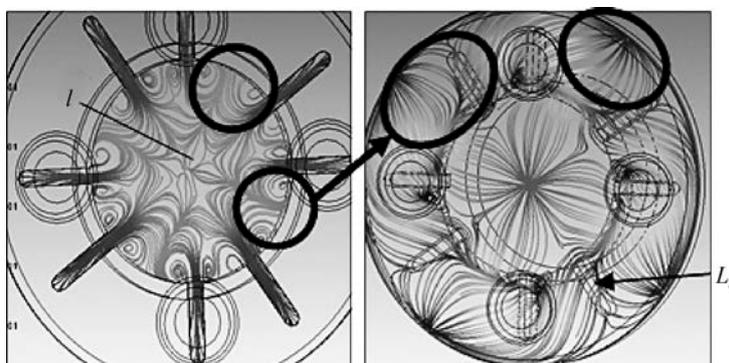


Рис. 3. Топология потока в канале и вблизи торца.

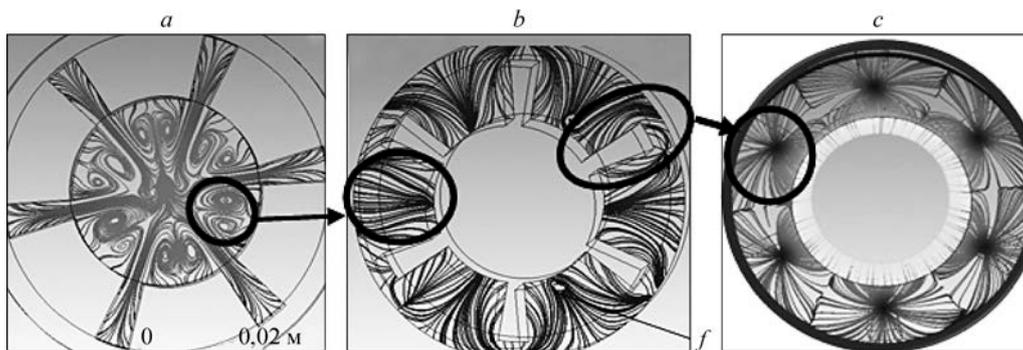


Рис. 4. Топология потока.

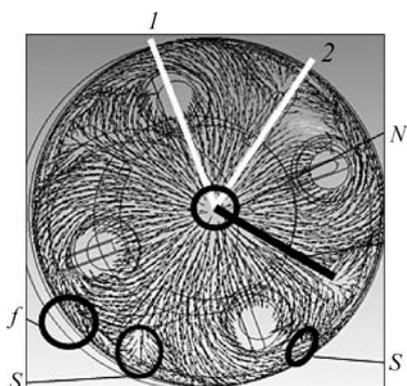
a — парные вихри между лучей звезды в канале, *b* — предельные линии тока вблизи торцевой поверхности, *c* — предельные линии тока вблизи входной части утолщенного сопла.

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.

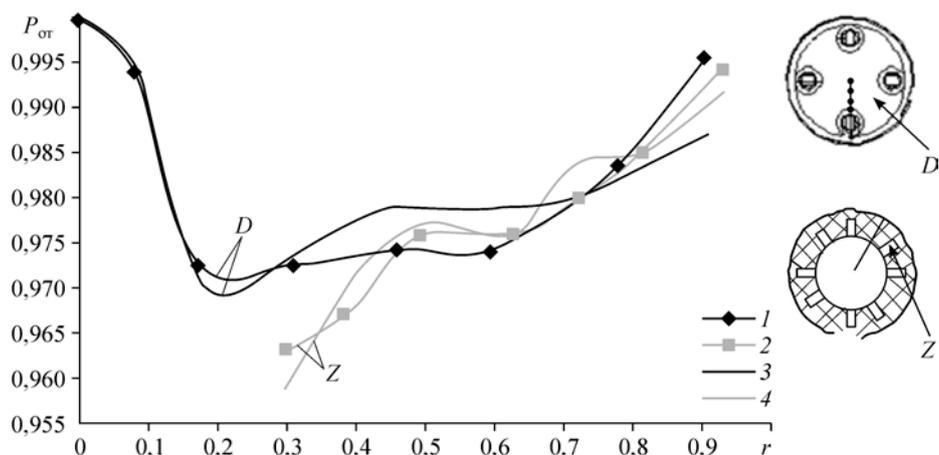


Рис. 6. Распределение относительного давления по поверхностям соплового дна и торца заряда.

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.

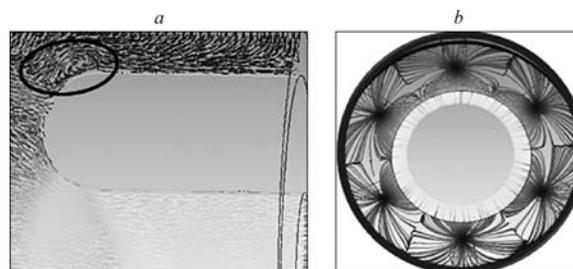


Рис. 7. Структура потока в околосопловом пространстве. *a* — надсопловой зазор, *b* — входная часть утопленного сопла.

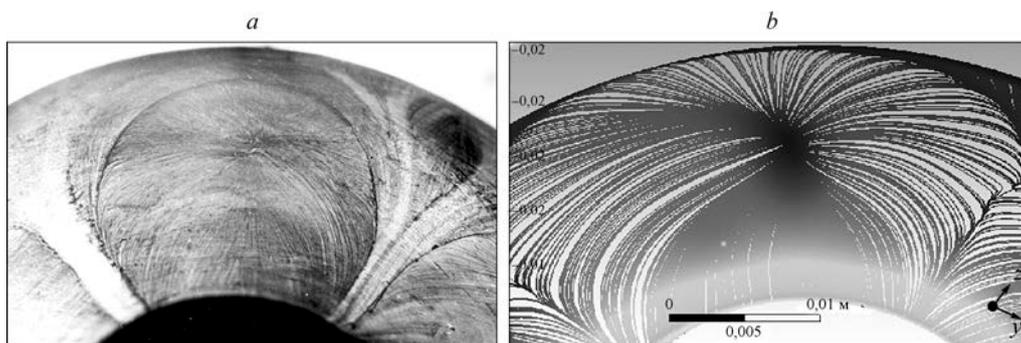


Рис. 8. Предельные линии тока вблизи входной поверхности утолщенного соплового блока. Экспериментальные (а) и расчетные (б) данные.

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.