

УДК 536.4

## АКУСТИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КАМЕР СГОРАНИЯ РДТТ

В. Ф. Ахмадеев (НИИ полимерных материалов, г. Пермь),  
С. В. Сухинин (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН),  
О. Б. Хайруллина (ИММ УрО РАН)

Разработана методика предсказания резонансных явлений в камерах сгорания, с тем чтобы еще на стадии проектирования с помощью различных конструктивных приемов исключить вихревой источник акустических колебаний давления в них. Разработан алгоритм определения чисел Струхала в камерах сгорания твердотопливных реактивных двигателей на основе численных и полуэмпирических исследований.

Для численного моделирования дозвуковых течений газа в камерах сгорания предлагается конечно-разностный итерационный метод. Использование в нем неортогональных оптимальных криволинейных сеток, специальной аппроксимации уравнений позволяет надежно диагностировать зоны образования вихрей в дозвуковой части газовых полостей камер, определять влияние газодинамических параметров и конструктивных особенностей камер на формирование поля скоростей и давления, образование стационарных крупномасштабных вихрей в потоке.

### Введение

Развитие техники обусловило появление новых классов реактивных двигателей на твердом топливе (РДТТ). Высокий уровень рабочего давления, использование быстрогорящих топлив, сложная геометрическая форма зарядов, нетипичные геометрии камер сгорания являются их характерными особенностями. Создатели двигателей столкнулись с проблемой акустической неустойчивости, для которой все известные методы ее подавления оказались малоэффективны. Это вызвало необходимость исследований физических и механических свойств самовозбуждающихся колебаний в двигателях, а также разработки эффективных средств и методов их подавления.

В настоящее время отсутствует методика прогнозирования устойчивости РДТТ на стадии проектирования. Выявление неустойчивости работы двигателя происходит только на этапе испытаний. Это приводит к материальным и временным затратам, поиску и разработке конструктивных изменений, вплоть до разработки новых решений, для подавления, затягивания или ликвидации неустойчивости в каждом конкретном двигателе.

Исследования устойчивости РДТТ включают исследование механизмов самовозбуждения колебаний (вибрационное горение, гидродинамическое возбуждение, импульсное возбуждение, резонансное взаимодействие колебаний основного потока газа с механическими и акустическими колебаниями системы), разработку методов моделирования и прогнозирования неустойчивости работы РДТТ, методов подавления колебаний как на стадии проектирования, так и на этапе испытаний двигателя.

В работах [1, 2] показано, что основным источником низкочастотных акустических колебаний в газовой полости РДТТ является гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур основного потока продуктов сгорания. В этом случае камера сгорания двигателя твердого топлива является в некотором смысле *обратным свистком*, так как вдув газа происходит через стенки камеры. Исследования механизма самовозбуждающихся аэроакустических колебаний в камерах сгорания РДТТ позволяют разрабатывать и внедрять на практике новые методы подавления колебаний, такие как ликвидация источника колебаний [1, 2] и подавление

колебания при помощи резонансных динамических поглотителей [3, 4].

В настоящей работе обобщены и усовершенствованы методика определения акустической неустойчивости и методы подавления ее в камерах сгорания РДТТ, представленные в [1–4]. Знание числа Струхала основного потока газа в камере и ее резонансных свойств позволяет определять акустическую устойчивость работы двигателя на стадии его проектирования. Для решения этой важной и актуальной задачи проведено более детальное исследование механики самовозбуждающихся колебаний в газовой полости РДТТ.

Для современных РДТТ характерно наличие сложных течений в газовых полостях и широкий диапазон скоростей (число Маха меняется от тысячных долей до единицы). Основная трудность при исследовании структуры потока в камере сгорания РДТТ — невозможность использования прямых методов исследования. Для определения чисел Струхала в силу специфики задачи невозможно провести достаточное количество натурных испытаний и лабораторных исследований. Поэтому численные исследования, лабораторное моделирование и косвенные данные натурных испытаний становятся главенствующими. Числа Струхала можно определить, используя комплексные методы, включающие в себя численные и полуэмпирические исследования.

Численное моделирование стационарных дозвуковых течений в газовой полости современного РДТТ представляет собой достаточно сложную задачу из-за большого диапазона изменения скоростей, наличия вихревых зон, взаимодействия встречных потоков, сложных геометрий расчетных областей. Нетривиален выбор модели среды (жидкой или газовой) и эффективного метода решения соответствующей системы уравнений. Использование (казалось бы, наиболее естественное) уравнений движения вязкого газа приводит при больших числах Рейнольдса к вычислительным сложностям и требует чрезвычайно подробных сеток [5, 6]. Выбор модели идеального невязкого газа для правильного моделирования вихревых зон основного потока заранее неочевиден и требует как разработки специальных алгоритмов расчета, учитывающих специфику задачи, так и сравнения с расчетами по моделям вязкой среды [7] и результатами эксперимента.

Анализ опубликованных алгоритмов по расчету завихренных течений показал, что все они

имеют в той или иной степени ограниченное применение. В большей части при их реализации заранее постулируется отсутствие замкнутых линий тока либо формулируются жесткие ограничения на геометрию расчетных областей [8, 9]. В некоторых работах допускаются только непрерывные, без изломов, проницаемые границы канала (горящая поверхность заряда) и, кроме того, оговаривается, что вектор скорости во всей области не должен существенно менять свое направление [10]. Обзор методов расчета дозвуковых течений в каналах приведен в [11].

В настоящей работе газодинамические вихревые течения в осесимметричных односвязных камерах сгорания сложных конфигураций, как с сопловой частью, так и без нее, рассчитываются новым конечно-разностным итерационным методом [11], являющимся результатом развития подхода [8]. Отличительная особенность метода — использование специальных гладких неортогональных оптимальных криволинейных сеток, что позволяет снять существенные ограничения на класс рассматриваемых геометрий каналов. Использование специальной аппроксимации уравнений, учитывающей криволинейность сеток, а также прямого экономичного метода с регуляризацией для обращения блочно-диагональных матриц позволило эффективно численно исследовать течения газа в осесимметричных односвязных каналах произвольных геометрий с образованием большого числа замкнутых вихревых потоков при малых числах Маха.

В предлагаемой работе на основе численных и полуэмпирических исследований впервые делается попытка предсказания резонансных явлений в камерах сгорания РДТТ на стадии их проектирования.

### Натурные испытания и лабораторные исследования

Возникновение вынужденных акустических колебаний в камере сгорания РДТТ определяется соотношением мощностей источников и стоков акустической энергии. Автоколебания обусловлены наличием нелинейного источника и обратной связи. Аэроакустические автоколебания возникают в том случае, когда частота собственных продольных колебаний камеры сгорания попадает в полосу захвата нелинейного источника, определяемого гидродинамической неустойчивостью [12].

Повышенный интерес к гидродинамическим источникам акустической энергии в камерах сгорания объясняется тем, что их мощность соизмерима (а в случаях акустического резонанса значительно превышает) с мощностью общепринятого источника колебаний, обусловленного взаимодействием зон сгорания и фазового перехода твердого топлива с акустическими колебаниями продуктов сгорания. Типичные примеры акустических колебаний — пульсаций давления — в камерах сгорания РДТТ приведены на рис. 1 для типовых конструкций камер сгорания с равномерным и неравномерным заполнением топливом.

Прямое изучение колебаний в газовой полости РДТТ с использованием натуральных испытаний и экспериментальных методов связано с рядом сложностей и большими материальными затратами. Это вызвано тем, что внутренняя полость камеры сгорания труднодоступна для наблюдений, а сами методы измерения параметров высокотемпературных и агрессивных сред недостаточно совершенны. В связи с этим существенное значение имеют косвенные методы.

Цель экспериментальных исследований и натуральных наблюдений состоит в косвенном изучении влияния вихревых макроструктур в застойной зоне потока продуктов сгорания в газовой полости на устойчивость работы РДТТ.

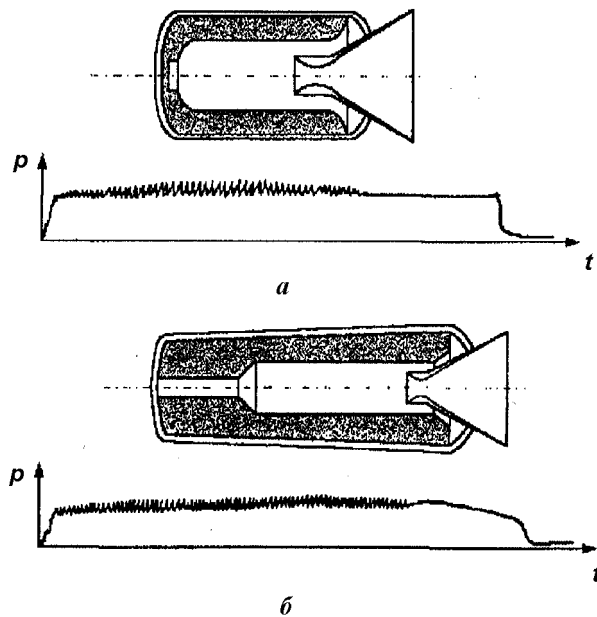


Рис. 1. Типовые конструкции камер сгорания с равномерным (а) и неравномерным (б) заполнением топливом и соответствующие графики зависимости давления от времени горения

Для выяснения влияния вихревых макроструктур и контактных разрывов на устойчивость работы типовых конструкций камер сгорания (см. рис. 1) исследовалась работа этих же камер, но с конструктивными модификациями, меняющими застойную зону и параметры контактных разрывов. Рассматривались три вида конструктивных изменений газовой полости, при этом все параметры основного потока, обуславливающие режим горения топлива, оставались неизменными.

В первом случае на входе в сопло устанавливалась разделительная решетка (рис. 2,а), во втором и третьем случаях — разделительные козырьки (рис. 2,б,в) разной формы. Эти конструктивные изменения обеспечили устойчивую работу обоих типов камер сгорания, и пульсация давления исчезла (ср. рис. 2,г,д и рис. 1,а,б). Локально осредненные по времени значения давления в камерах сгорания с конструктивными доработками и без них во всех случаях совпадали.

Объяснить влияние разделительных решеток и козырьков на устойчивость работы реактивных твердотопливных двигателей нестационарным горением невозможно. Эти элементы конструкций могут изменить основной поток газа только в окрестности сопла, но не могут влиять на процесс горения. Указанными экспериментами схема возбуждения колебаний горением ставится под сомнение.

Однако влияние конструктивных доработок можно объяснить тем, что решетки и козырьки акустически активны. Они могут поглощать акустические колебания при помощи механизма их преобразования в вихревые возмущения основного потока газа. В этом случае происходит преобразование акустической энергии колебаний в кинетическую энергию вихрей, образующихся в окрестности кромок схода основного потока с разделительных решеток или козырьков и движущихся с основным потоком газа. Влияние этого механизма поглощения колебаний можно объяснить затягиванием развития колебаний во времени или их полной ликвидацией. Однако такое объяснение не вполне удовлетворительно, так как кромки схода разделительных решеток и козырьков находятся в окрестности узла продольных акустических колебаний скорости. Поэтому в окрестности этих элементов конструкций колебаний скорости нет и указанные конструктивные изменения акустически пассивны.

Наиболее существенное влияние разделительная решетка и козырек оказывают на линии тока основного потока газа в камере сгорания. Де-

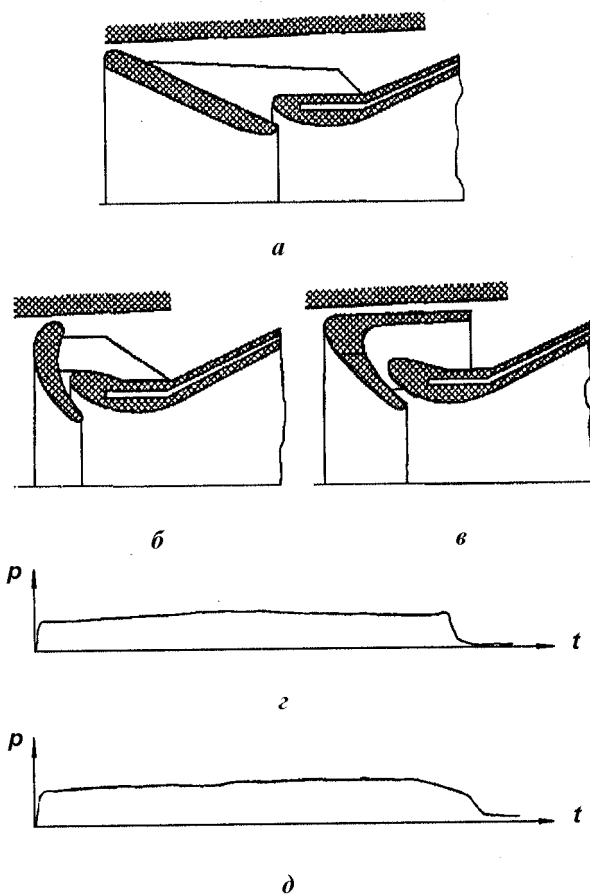


Рис. 2. Сопловая часть камеры сгорания с разделительной решеткой (а) и разделительными козырьками (б, в); графики зависимости давления от времени горения в камерах сгорания с равномерным (з) и неравномерным (д) заполнением топливом

формация линий тока приводит к изменениям характерных размеров контактных разрывов и застойных зон в камерах, что, в свою очередь, вызывает сдвиг вихревых частот, которые определяют частоту источника колебаний. Полоса захвата нелинейного гидродинамического источника акустических колебаний отстраивается от акустической собственной частоты камеры сгорания, нарушается или ослабляется обратная акустическая связь, и колебания в камерах сгорания не возникают [1].

Исследовано влияние на устойчивость работы РДТТ еще одной конструктивной доработки камеры сгорания, приведенной на рис. 3,а. В днище камеры сгорания, где образуются крупномасштабные вихревые структуры, проделаны четыре отверстия (на рисунке видны два), при этом площадь сечения сопла уменьшена на ве-

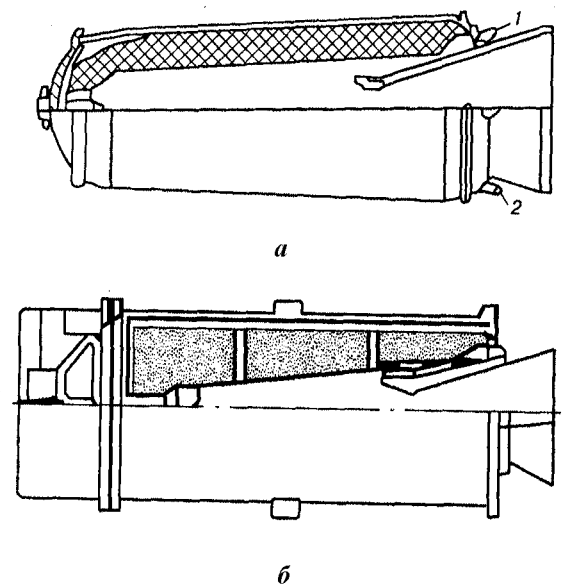


Рис. 3. Камера сгорания с отверстиями в днище (а) и ее механическая модель (б) для экспериментальных исследований

личину суммарной площади отверстий. Доработка не изменила суммарный расход газа, но обеспечила устойчивость работы двигателя. Динамические характеристики камеры не изменились, условия горения топлива остались прежними. Так как в окрестности отверстий в днище камеры наблюдается резкий поворот потока и, следовательно, полное отражение акустических волн, то сохраняются и акустические свойства камеры. Эффективность этой конструктивной доработки невозможно объяснить вибрационным горением топлива или увеличением поглощения акустической энергии в камере за счет отверстий в днище камеры.

Влияние всех указанных конструктивных изменений на ликвидацию колебаний в двух типах камер сгорания достаточно достоверно объясняется наличием в камерах гидродинамических источников колебаний [1], обусловленных неустойчивостью крупномасштабных вихревых структур или застойных зон основного потока газа, которые находятся около днища камеры.

Для проверки взаимодействия вихревых и акустических полей проведены экспериментальные исследования на механической модели камеры сгорания. Газовая полость этой модели воспроизводила геометрические размеры и потоки в исследованной численно области [2]. Для такой же камеры сгорания были проведены натурные испытания. В механической модели вместо твер-

дого топлива реальной камеры помещался имеющей соответствующую форму пористый материал, через который пропускался воздух. Интенсивность горения топлива моделировалась различными скоростями потока воздуха через пористые стенки. Моделирование газовой полости для различных времен работы РДТТ проводилось при помощи выбора толщины и формы пористого материала. Принципиальная схема механической модели представлена на рис. 3,б.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что источником низкочастотных акустических колебаний в механической модели камеры сгорания РДТТ является гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур, обусловленных геометрией камеры. Экспериментально показано, что амплитуда колебаний будет наибольшей, если вихревая частота близка к собственной акустической частоте камеры.

### Численное моделирование потоков газа

Математическое моделирование процессов движения газов в камерах сгорания связано с преодолением многих трудностей, таких как:

- большой диапазон изменения параметров течения газа — скорость потока меняется от дозвуковой (от тысячных долей Маха) до сверхзвуковой;
- образование вихревых зон с замкнутыми линиями тока из-за сложности геометрий камер сгорания РДТТ и взаимодействия встречных потоков в дозвуковой области;
- большие числа Рейнольдса;
- сильно меняющаяся форма поверхности горения.

Успех расчетов, позволяющих правильно передать особенности описанных явлений, связан как с выбором надежных математических моделей, так и с созданием эффективных алгоритмов и программ, позволяющих исследовать большое число достаточно разнообразных конструкций.

Пусть камеры сгорания представляют собой осесимметричные односвязные каналы  $\Omega$  сложных геометрий с сопловой частью (см., например, рис. 4), поверхности которых состоят из участков пористой поверхности (вдува газа), твердых стенок и участков выхода газа. Считаем, что:

- размеры пограничных слоев, нарастающих вдоль стенок, малы по сравнению с поперечными размерами каналов;
- пограничные слои не взаимодействуют между собой;
- в области сопла нет возвратного течения;
- вдуваемый газ однороден, но неизоэнергетичен;
- неоднородность давления, обусловленная неустановившимся течением газа, пренебрежимо мала;
- течение газа квазистационарно.

В силу этих предположений для численного моделирования газодинамических процессов в камерах можно использовать модель совершенного газа [12, 13], параметры течения которого в каждый момент времени удовлетворяют системе уравнений Эйлера:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho r \mathbf{v}) &= 0; \\ \rho(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} + \nabla p &= 0; \\ \operatorname{div}(\rho r H \mathbf{v}) &= 0; \\ p &= \rho R T, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность газа;  $\mathbf{v}$  — вектор скорости с координатами  $v_1, v_2$ ;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $x, r$  — координаты области  $\Omega$ ;  $R$  — газовая постоянная;  $\gamma$  — показатель адиабаты. Полная энтальпия  $H$  имеет вид

$$H = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{v}^2}{2}. \quad (2)$$

При исследовании процессов в камере сгорания рассчитывается серия вариантов течений газа для фиксированных геометрий поверхности горения, соответствующих фиксированным мо-



Рис. 4. Камера сгорания конусной формы и линии тока газа в ней. Замкнутые вихревые потоки в зонах переднего (а) и заднего (b) днищ камеры

На границе вдува (горящая поверхность заряда)  $\Gamma_1$  задаются плотность и вектор скорости вдува газа, направленный по нормали  $\mathbf{n}$  к  $\Gamma_1$ :

$$\rho|_{\Gamma_1} = \rho_0; \quad \sqrt{v_1 + v_2}|_{\Gamma_1} = v_n, \quad \cos \mathbf{vn}|_{\Gamma_1} = 1. \quad (3)$$

В методике [8], на основе которой разрабатывался данный алгоритм, на границе заряда  $\Gamma_1$  задавались поток массы  $\rho_0 v_n = \nu_1(s)$  и, как правило, постоянная энтальпия  $H$ . В результате рассчитывалось изоэнергетическое течение газа [11].

На непроницаемой границе  $\Gamma_0$  (днище и корпус РДТТ) должно выполняться условие непротекания

$$\mathbf{vn}|_{\Gamma_0} = 0. \quad (4)$$

На выходе  $\Gamma_2$  (входной раструб сопла) задается нормальная составляющая вектора потока массы:

$$\rho \mathbf{vn}|_{\Gamma_2} = \nu_2(s). \quad (5)$$

Граничные условия должны удовлетворять соотношению баланса масс

$$\oint_{\Gamma} \nu(s) r ds = 0, \quad \nu(s) = \begin{cases} \nu_1(s) < 0, & s \in \Gamma_1; \\ \nu_2(s) > 0, & s \in \Gamma_2; \\ 0, & s \in \Gamma_0, \end{cases}$$

являющемуся необходимым условием разрешимости задачи (1)–(5). Здесь  $s$  — длина дуги границы  $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2$  расчетной области ( $s$  растет так, что область  $\Omega$  остается слева). В некоторой точке  $M_0$  задано давление  $p_0 = p(M_0)$  (давление торможения или давление в критическом сечении). На оси симметрии  $r = 0$  выполняются условия симметрии

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial \rho}{\partial r} = 0.$$

Как и в [8], после введения функции тока  $\psi$ ,

$$\rho r v_1 = \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \rho r v_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (6)$$

и вихревой функции

$$\omega = -\frac{\partial v_1}{\partial r} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \quad (7)$$

исходная система уравнений (1) смешанного типа расщепляется на одно уравнение эллиптического типа второго порядка для  $\psi$  при фиксированной  $\omega$  и два уравнения гиперболического типа для  $\omega$  и  $H$  при фиксированной  $\psi$ .

Поставленная задача может не иметь гладкого решения, поэтому вводится понятие обобщенного решения [8], и система уравнений записывается в интегральной форме [11]:

$$\begin{aligned} \oint_C \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} dx - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial x} dr \right) &= \iint_{D_C} \omega dx dr; \\ \oint_C \left( \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} dr \right) &= \oint_C \left( -\frac{\rho}{2} \frac{\partial v^2}{\partial x} dx - \frac{\rho}{2} \frac{\partial v^2}{\partial r} dr \right); \quad (8) \\ \oint_C \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} H dx + \frac{\partial \psi}{\partial r} H dr \right) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь  $D_C$  — произвольная подобласть области  $\Omega$ , ограниченная контуром  $C$ .

Для давления имеем соотношение

$$p = p_0 - \int_{L(M_0, M)} \left[ \left( \rho \frac{\partial}{\partial x} \frac{v^2}{2} - \rho v_2 \omega \right) dx + \left( \rho \frac{\partial}{\partial r} \frac{v^2}{2} + \rho v_1 \omega \right) dr \right], \quad (9)$$

где  $L(M_0, M)$  — произвольная кривая, соединяющая точку  $M_0$ , в которой давление задано, с точкой  $M$ , в которой оно ищется.

При расчете течений газа в новых переменных на входных участках границы рассчитывается завихренность потока газа (7), поэтому выбор модели совершенного газа оправдан. В этом случае и в рамках идеального газа могут образовываться вихревые зоны с замкнутыми линиями тока [14].

Формы газовых полостей РДТТ достаточно сложны. Расчет течения в таких областях на прямоугольных сетках может вызвать определенные трудности. Поэтому при решении задачи используются криволинейные оптимальные координатные сетки, связанные с границей области. Участки границы заданной области в криволинейной системе координат объявляются координатными линиями, область представляется в виде прямоугольника или совокупности прямоугольников, в которых вводится равномерная ортогональная сетка. Для отображения ее на заданную область  $\Omega$  в плоскости  $(x, r)$  используются специальные координатные преобразования, которые минимизируют функционал определенного вида, формализующего критерии близости сеток к равномерным и ортогональным. Использование оптимальных криволинейных сеток позволило снять ограничения на класс рассматриваемых конфигураций каналов, а их хорошие аппроксимационные свойства явились осно-

вой успеха при построении быстрых итерационных процессов расчета течений в каналах сложных конфигураций. Подробно алгоритм построения оптимальных криволинейных сеток описан в [15].

Уравнения (8) и соотношения (6), (7), (9) записываются в криволинейной системе координат и далее для численного моделирования аппроксимируются конечными разностями таким образом [11], что учитываются криволинейность сеток и направление потока газа, точно передается постоянное течение в цилиндрической трубе. Соотношение (9) для давления аппроксимируется согласованно с уравнением для вихревой функции [8].

При аппроксимации в плоскости криволинейных координат используются две равномерные ортогональные сетки, смещенные относительно друг друга на полшага в обоих направлениях. На основной сетке, состоящей из множества узлов с целыми индексами, рассчитываются функция тока  $\psi$ , давление  $p$ , плотность  $\rho$ , компоненты вектора скорости  $\mathbf{v}$ . Вычисление вихревой функции  $\omega$  и энтальпии  $H$  на вспомогательной сетке с полуцелыми индексами освобождает от расчета этих функций в угловых точках сетки и точках излома границы.

При образовании замкнутых вихревых потоков диагональные элементы матриц систем линейных алгебраических уравнений, полученных в результате аппроксимации, могут быть близки к нулю и матрицы становятся *жесткими*. Поэтому на каждой итерации для решения систем разностных уравнений используется прямой экономичный блочный метод Гаусса с регуляризацией. Программная реализация метода существенно учитывает блочную трехдиагональную структуру матриц.

Итерационный процесс строится следующим образом. На каждой итерации поочередно рассчитываются функция тока, компоненты вектора скорости, давление, вихревая функция и энтальпия, плотность. При очередном расчете какой-либо из этих функций остальные берутся с предыдущей итерации. В качестве результата нулевой итерации берется вихревое течение несжимаемой жидкости, рассчитанное исходя из заданных граничных условий.

Действенность метода и соответствующего комплекса программ СОКОЛ исследовалась с помощью сравнения [11] расчетов с точными решениями — аналитическими решениями для установившегося вихревого течения несжимае-

мого невязкого газа в цилиндрическом канале с проницаемыми стенками и открытыми торцами (постоянное течение) либо одним закрытым торцом ( $x = 0$ ) [16]. Кроме того, сравнивались расчеты некоторых задач на сетках, отличающихся друг от друга как числом узлов, так и направлением сеточных линий, а также проводилось сравнение с результатами расчетов по другим методикам и программам как в рамках идеального газа [8], так и в рамках вязких сжимаемого газа и несжимаемой жидкости [7]. Результаты сравнения показали хорошее качественное и количественное согласование, подтвердили возможность использования модели идеальной сжимаемой газовой среды для расчета вихревых течений в каналах и действенность алгоритма.

По разработанной методике проведен расчет полей скоростей и давлений в газовой полости РДТТ конусной формы, который имеет прочно скрепленный с корпусом канальный заряд и утопленное сопло. На рис. 4 представлены изолинии функции тока. Анализ результатов расчетов показывает, что замкнутые вихревые потоки образуются в зоне заднего днища между боковой поверхностью канала заряда и утопленным соплом (на рис. 4 вихрь  $b$ ), а также в районе переднего днища (на рис. 4 вихрь  $a$ ). Возникновение вихря в головной части зависит от входных параметров газа с горящей поверхности заряда, а в хвостовой части — от геометрии области и степени утопленности сопла. В результате численных исследований обнаружено, что при увеличении скорости и уменьшении плотности вдува газа на 10% по сравнению с исходными данными вихрь в головной части исчезает.

### Числа и частоты Струхала. Механизмы источника колебаний

На фоне предварительно рассчитанных вихревых течений в камерах сгорания можно рассчитать собственные частоты акустических колебаний газа в них [17, 18]. В качестве модели для расчета частот собственных колебаний завихренного потока газа выбраны линеаризованные при условии квазистационарности потока газа нестационарные уравнения газовой динамики с использованием понятия квазипотенциала. Из уравнения для квазипотенциала получена система уравнений эллиптического типа, для которой поставлена задача о нахождении собственных частот и собственных функций при

общих краевых условиях с использованием параметров акустической проводимости топлива. Характерной особенностью, значительно усложняющей задачу, является тот факт, что краевые условия включают неизвестную частоту.

Для решения задачи методом Галеркина вводится специальная система базисных функций, при построении которой интегрируется система обыкновенных дифференциальных уравнений. Эта задача оказалась нетривиальной и потребовала разработки специальных методов. Для нахождения корней характеристического определителя, элементы которого нелинейно зависят от частоты, использованы новые приемы ускорения итерационных процедур. Методика оказалась достаточно эффективной и позволила рассчитывать акустические параметры для широкого класса геометрий камер сгорания. Был обнаружен эффект заметного смещения частот в сторону их уменьшения в случае наличия вихревых зон в потоке.

При натурных испытаниях измерить пульсации давления в камере сгорания практически невозможно из-за специфики условий. Однако резонансные явления фиксируются с высокой степенью точности. Поэтому в камерах сгорания РДТТ исследовались только резонансные колебания, длина которых значительно больше поперечных размеров. Они возникают, как правило, на частотах продольных мод [3].

В окрестности сопла наблюдается резкий поворот основного потока газа, скорость потока меняется от дозвуковой до сверхзвуковой. В результате происходит сильная рефракция акустических волн и их полное отражение от сопла [3, 4]. Это определяет собственные частоты  $f_m$  продольных колебаний в газовой полости РДТТ как в закрытой с обоих концов трубе. Для этих частот справедливо выражение [3]

$$f_m = \frac{c}{2L}m, \quad m = 1, 2, \dots$$

где  $L$  — длина камеры сгорания;  $c$  — скорость звука в камере. При этом низкочастотные акустические колебания вызваны наличием неустойчивых крупномасштабных замкнутых вихревых потоков.

Заданная геометрия камеры сгорания в окрестности заднего днища и рассчитанное поле скоростей в ней позволяют определить числа  $Sh$  и частоты  $f$  Струхала, обусловленные гидродинамической неустойчивостью контактного разрыва между потенциальным и вихревым

течениями в камере или неустойчивостью компактного вихревого образования в целом. Числа (безразмерные коэффициенты, зависящие от чисел Рейнольдса продуктов сгорания) и частоты Струхала связаны соотношением [19]

$$Sh = f \frac{l}{v}, \quad (10)$$

где  $l$ ,  $v$  — некоторые характерные поперечный размер обтекаемого препятствия и скорость обтекания соответственно. Так как геометрия камеры сгорания в окрестности днища является сложной и скорость основного потока газа в камере меняется от тысячных долей числа Маха до единицы, то определение характерных скоростей и размеров, входящих в выражение (10), представляет собой специальную задачу.

На рис. 5 более детально представлена структура линий тока основного потока газа в зоне заднего днища. Линия  $AB$  — контактный разрыв между вихревым и потенциальным течениями потока продуктов сгорания.

Период источника колебаний, обусловленного гидродинамической неустойчивостью контактного разрыва, обычно определяется временем прохождения малого возмущения вдоль линии контактного разрыва. Поле скоростей основного потока газа в камере сгорания можно найти численно, следовательно, можно определить период и частоту этих колебаний.

Перенос малых гидродинамических возмущений (слабых вихрей) [17] происходит со скоростью основного потока (конвективный перенос), поэтому время  $t_c$  переноса вихревого возмущения вдоль линии контактного разрыва от  $A$  к  $B$  определяется по формуле

$$t_c = \int dt = \int \frac{dl}{v(l)} = \sum_k \frac{dl_k}{v_k}, \quad (11)$$

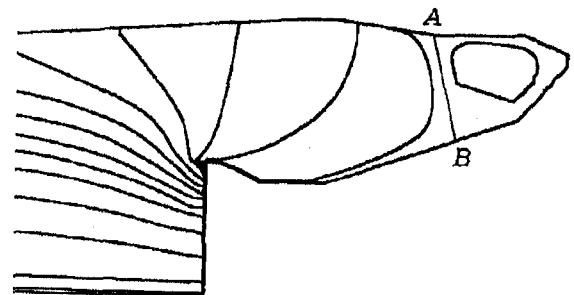


Рис. 5. Структура течения потока газа в надсопловой части камеры сгорания



где  $dl_k$  — элемент длины линии  $AB$ ,  $v_k$  — скорость газа на  $k$ -м интервале.

Период колебаний определяется временем  $t_c$ . Из (11) для рассматриваемого канала (см. рис. 4) получено  $t_c \approx 0,1$  с, но это значение отличается от натуральных и экспериментальных данных в 15 раз. Следовательно, выражение (11) не подходит для вычисления периода колебаний. Используя разные модификации вычисления выражения (11) и числа Струхалия, получали  $Sh \approx 5 \div 20$ , что является неудовлетворительным с точки зрения физики и механики исследуемого явления.

Если, следуя [20], определим  $v$  как среднерасходную скорость потока газа на входе в сопло, а  $l$  как характерный размер контактного разрыва (длина  $AB$ ), то вычисление числа Струхалия приводит к  $Sh \approx 0,2$ , что является достаточно близким к значению, полученному экспериментально.

Знание числа Струхалия позволяет выявить механизмы автоколебаний в камере сгорания РДТТ. Основной задачей изучения работы источника колебаний является исследование нелинейных механизмов, организующих колебания, и обратной связи. В результате проведенных численных, экспериментальных и натуральных исследований акустических колебаний и крупномасштабных вихревых структур основного потока продуктов сгорания в газовой полости РДТТ установлено, что:

- источником акустических колебаний в газовой полости РДТТ является гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур;
- колебания в камере сгорания определяются периодической перестройкой крупномасштабных вихревых структур в застойной зоне около заднего днища;
- колебания в газовой полости РДТТ определяют акустическую обратную связь.

Действие источника колебаний состоит из возбуждения акустических волн в газовой полости РДТТ, определяемого перестройкой вихревой структуры в застойной зоне, влияния акустических колебаний на гидродинамическую неустойчивость вихревой структуры, самосинхронизации гидродинамических и акустических колебаний.

Схема механики автоколебаний представлена на рис. 6.

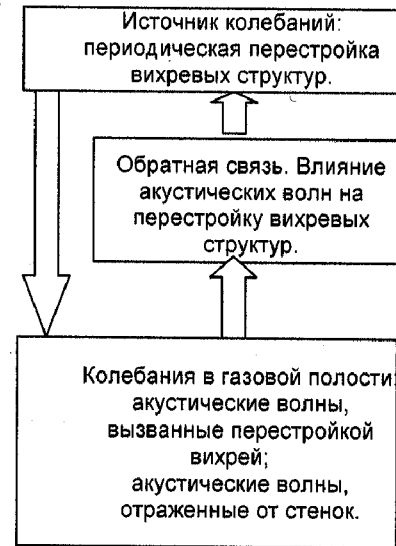


Рис. 6. Схема механики автоколебаний

### Заключение

Разработана итерационная конечно-разностная методика СОКОЛ для расчета стационарных вихревых потоков в камерах сгорания РДТТ сложной формы, которая позволяет надежно диагностировать зоны образования вихрей в дозвуковой части каналов, определять влияние газодинамических параметров и конструктивных особенностей каналов на формирование поля скоростей и давления, на образование стационарных крупномасштабных вихрей в потоке, еще на стадии проектирования. Тем самым впервые делается попытка подойти к решению важной и актуальной задачи — с помощью различных конструктивных приемов исключать вихревой источник акустических колебаний давления в каналах.

Проведенные расчеты газодинамических параметров потоков продуктов сгорания в РДТТ с утопленным соплом показали, что замкнутые вихревые потоки образуются в зоне заднего днища между боковой поверхностью канала и утопленным соплом, а также в области переднего днища. Утопленное сопло перераспределяет поток и влияет на образование и распад крупномасштабных вихрей в потоке. Возникновение вихря в головной части зависит от входных параметров продуктов сгорания с горячей поверхности заряда.

На основании проведенных численных, экспериментальных и натуральных исследований пока-

зано, что колебания в камере сгорания определяются периодической перестройкой крупномасштабных вихревых структур в застойной зоне около заднего днища камеры.

Для газовой полости РДТТ конусной формы проведен расчет числа Струхала потока продуктов сгорания, исследованы механизмы автоколебаний.

Авторы посвящают свою работу памяти члена-корреспондента РАН Л. Н. Козлова и академика РАН А. Ф. Сидорова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 02-01-00236).

### Список литературы

1. *Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф.* Гидродинамические источники колебаний в камерах сгорания // ФГВ. 1993. № 6. С. 38—46.
2. *Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф.* Колебания и вихри в камерах сгорания // Изв. вузов. Физика. 1994. № 4. С. 111—118.
3. *Ахмадеев В. Ф., Корляков В. Н., Козлов Л. Н., Курзин В. Б., Сухинин С. В., Юдин В. А.* Подавление акустических колебаний в камерах сгорания резонансными поглотителями. М.: НПО "Информ ТЭИ". 1991.
4. *Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф.* Оптимизация поглотителя колебаний в камере сгорания // ПМТФ. 1993. № 5. С. 79—88.
5. *Лебедев А. С., Спиридонов Ф. Ф., Тенев В. Л.* Численный метод расчета вязких двухслойных двухфазных течений в РДТТ с утопленным соплом // Вопрос спец. машиностроения. Сер. 2. 1985. Вып. 8. С. 232.
6. *Ахмадеев В. Ф.* Численное исследование течений вязкой жидкости в каналах сложной формы методом конечных элементов // Моделирование в механике. 1990. Т. 4 (21), № 3. С. 8—12.
7. *Ахмадеев В. Ф., Сидоров А. Ф., Спиридонов Ф. Ф., Хайруллина О. Б.* О трех методах численного моделирования дозвуковых течений в осесимметричных каналах сложной формы // Там же. № 5. С. 15—25.
8. *Хакимзянов Г. С., Яушев И. К.* Итерационный метод расчета двумерных дозвуковых установившихся внутренних течений идеальной сжимаемой жидкости: Препринт № 4—87. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1987.
9. *Рычков А. Д.* Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988.
10. *Осипов А. И., Пащенко В. П., Шипилин А. В.* Расчет течений невязкого газа в каналах с сильно изменяющейся геометрией // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 1978. Т. 18, № 4. С. 964—973.
11. *Хайруллина О. Б.* Моделирование вихревых течений газа в каналах сложных конфигураций. Научные доклады: Препринт. Екатеринбург: УрО РАН, 1997.
12. *Ахмадеев В. Ф., Гусева Г. Н., Козлов Л. Н., Сухинин С. В., Хайруллина О. Б.* Гидродинамические источники акустических колебаний в камерах сгорания. М.: ЦНИИ-НТИКПК, 1990.
13. *Райзберг Б. А., Ерохин Б. Т., Самсонов К. П.* Основы теории рабочих процессов в реактивных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972.
14. *Капцов О. В.* Новые решения двумерных стационарных уравнений Эйлера // Прикладная математика и механика. 1990. Т. 54, вып. 3. С. 409—415.
15. *Khairullina O. B.* Method of constructing block regular optimal grids in two-dimensional multiply connected domains of complex geometries // Russ. J. Numer. Anal. and Math. Modelling. 1996. Vol. 11, No 4. P. 343—358.
16. *Кулик Ф. Е.* Вихревое осесимметричное осредненное течение и демпфирование акустических волн в РДТТ // Ракетная техника и космонавтика. 1966. Т. 4, № 8. С. 195—197.
17. *Кокковихина О. В.* Математическое моделирование акустических эффектов в каналах сложной формы. Научные доклады: Препринт. Екатеринбург: УрО РАН, 1998.
18. *Ваганова Н. А., Коврижных О. О., Кокковихина О. В., Сидоров А. Ф., Хайруллина О. Б.* Газодинамические и акустические эффекты в камерах сгорания РДТТ // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. "Первые Окуневские чтения". Т. 1. Баллистика. С.-Пб.: БГТУ, 1999. С. 118—129.

19. *Блохинцев Д. И.* Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981.
20. *Вишняков В. А., Засецкий В. Г., Каравосов Р. К., Прозоров А. Г., Соколинский Л. И.* Возбуждение интенсивных пульсаций давления при повороте потока в тракте с тупи-

ковой полостью // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1998. № 2. С. 104—111.

Статья поступила в редакцию 8.10.03.

---