

## АВТОКОЛЕБАНИЯ В ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

С. В. Сухинин, В. Ф. Ахмадеев\*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

\* НИИ ПМ НПО им. С. М. Кирова, 614024 Пермь

Установлено, что автоколебания в газовой полости реактивного двигателя твердого топлива обусловлены неустойчивостью и периодическим перестроением крупномасштабных компактных вихревых структур в застойных зонах основного потока продуктов сгорания. На основании косвенных данных натурных испытаний и экспериментальных исследований установлено, что между боковой поверхностью газовой полости и утопленным соплом, а также в районе переднего днища двигателя образуются компактные застойные зоны. Разработана и апробирована методика расчета и предсказания чисел Струхалея и акустических резонансных явлений в газовой полости камеры сгорания двигателя твердого топлива, обусловленных перестройкой компактных крупномасштабных вихревых структур.

### ВВЕДЕНИЕ

Создатели нового поколения реактивных двигателей твердого топлива (РДТТ) столкнулись с проблемой акустической неустойчивости в газовой полости, для которой ранее известные методы предсказания и подавления автоколебаний оказались малоэффективными. Это привело к необходимости исследований процесса самовозбуждения колебаний в РДТТ. Целью настоящей работы являются исследование механизма источника автоколебаний и на основе этого разработка методики определения частот колебаний в газовой полости камеры сгорания РДТТ.

В [1, 2] показано, что источником низкочастотных акустических колебаний в газовой полости энергетических установок твердого топлива может быть гидродинамическая неустойчивость основного потока продуктов сгорания. В этом случае камера сгорания РДТТ является, в некотором смысле, обратным свистком, вдув газа происходит через ее стенки, а источник автоколебаний обусловлен гидродинамической неустойчивостью основного потока продуктов сгорания.

Результаты проведенного исследования самовозбуждающихся аэроакустических колебаний в камерах сгорания двигателей твердого топлива позволяют разрабатывать и внедрять в практику новые методы борьбы с колебани-

ями — ликвидация источника (или сдвиг его частоты) [1, 2] и подавление или затягивание развития колебаний при помощи динамических поглотителей [3, 4].

В современных РДТТ газовая полость камеры сгорания имеет сложную геометрию, а скорость основного потока газа изменяется в широком диапазоне (от дозвуковых до звуковой). Поэтому невозможно провести достаточное количество натурных и лабораторных исследований для определения чисел Струхалея. Прямые методы исследования также невозможны. Основное значение в этих условиях приобретают численные исследования, лабораторное моделирование процесса и косвенные данные натурных испытаний.

Результаты предлагаемой работы были доложены на конференции [5].

### 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили с целью изучить влияние конструктивных изменений в газовой полости камеры сгорания на устойчивость работы РДТТ и разработать меры, направленные на ликвидацию источника акустических колебаний в газовой полости или сдвиг его частоты (отстройка от резонансных частот акустических колебаний в газовой полости).

Несмотря на то, что колебания в камерах сгорания, как правило, нелинейны (их амплитуда может достигать 10 % от среднего давления в камере), на начальной стадии их разви-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-01-00713).

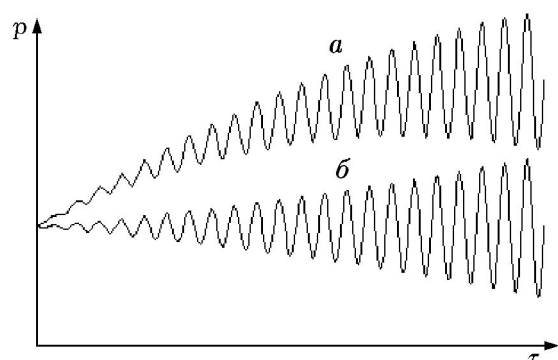


Рис. 1

тия они являются акустическими [6]. Это означает, что изучение и разработку эффективных методов подавления автоколебаний, а также их моделирование можно проводить в рамках линейного (акустического) приближения.

Существует несколько сценариев развития колебаний в газовой полости РДТТ, два из них, наиболее характерных, показаны на рис. 1 (здесь и далее на рисунках  $\tau$  — время,  $p$  — давление в камере сгорания РДТТ): *a* — развитие колебаний с сохранением среднего давления в камере сгорания, *b* — с повышением среднего давления в камере. Рост давления в камере сгорания свидетельствует о влиянии развитых колебаний на горение твердого топлива — вибрационное горение.

Схемы двух типов РДТТ, исследованных в настоящей работе, и колебаний в камере сгорания этих двигателей во время всего периода их работы приведены на рис. 2 (твердое топливо затемнено). Из-за выгорания топлива газовая полость камеры сгорания изменяется. Колебания давления в камере сгорания происходят на частотах первых мод собственных акустических колебаний газовой полости (продольных колебаний). Необходимо отметить, что для указанных типов РДТТ частоты собственных акустических колебаний для первых мод собственных продольных колебаний в процессе работы не изменяются.

#### Разделение основного потока на входе в сопло.

Для изучения влияния геометрии газовой полости на устойчивость ее работы исследовано влияние трех конструктивных изменений для указанных типовых конструкций камер сгорания (см. рис. 2). Все газодинамические параметры основного потока, обуславливающие режим горения топлива, во всех случаях оставались неизменными.

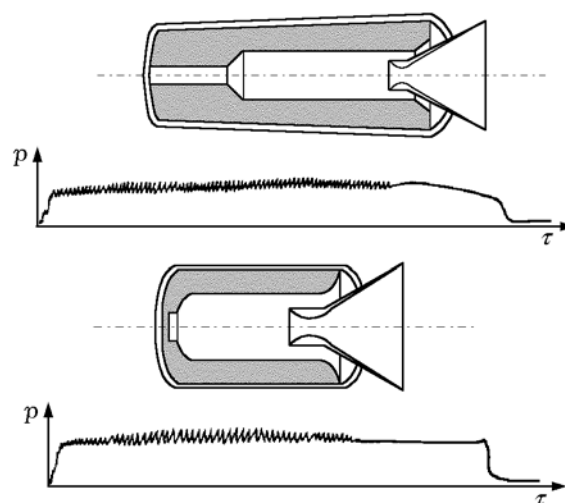


Рис. 2

На рис. 3 показаны окрестности входных кромок сопел, конструктивные доработки и часть поверхности твердого топлива: *a* — на входе в сопло установлена разделительная решетка, *b*, *в* — разделительные козырьки различного вида. Эти конструктивные изменения обеспечили устойчивую работу обоих типов камеры сгорания. Локальные значения давления (осредненные по времени) в камерах сгорания с доработками и без них во всех шести случаях совпадали.

Влияние разделительных решеток и козырьков на устойчивость работы РДТТ невозможно объяснить нестационарным горением. Эти конструктивные доработки изменяют течение в окрестности сопла и не влияют на ре-

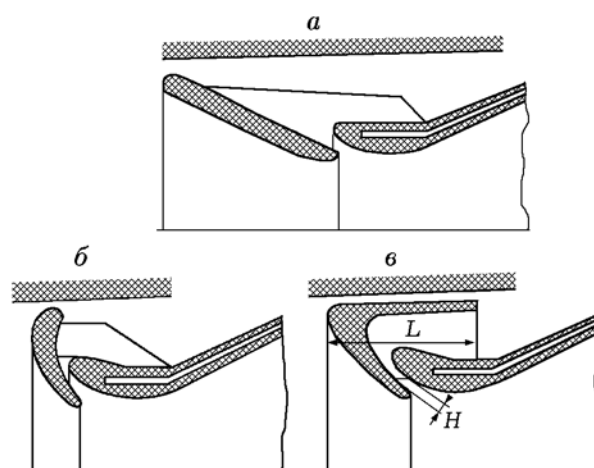


Рис. 3

жим горения. Гипотеза о том, что автоколебания в камерах сгорания возбуждаются вибрационным горением твердого топлива, ставится под сомнение результатами шести указанных натуральных экспериментов.

Влияние этих конструктивных изменений на подавление или затягивание автоколебаний в РДТТ можно было бы объяснить тем, что решетки и козырьки акустически активны. Они могут поглощать акустические колебания, преобразуя акустическую энергию колебаний в кинетическую энергию вихрей, образующихся в окрестности кромок схода основного потока с разделительных решеток или козырьков и движущихся с основным потоком газа. Однако это объяснение не вполне удовлетворительно, поскольку кромки схода указанных на рис. 3 разделительных решеток и козырьков находятся вблизи узла продольных акустических колебаний скорости, в окрестности разделительной решетки или козырька колебаний скорости нет и указанные конструктивные изменения акустически пассивны.

**Дополнительные сопла.** Для того чтобы уточнить механизм акустических автоколебаний в газовых полостях, было исследовано влияние еще одной специальной конструктивной доработки камеры сгорания на устойчивость работы РДТТ. Для изменения структуры основного потока в газовой полости в днище камеры сгорания РДТТ были проделаны четыре дополнительных сопла, площадь сечения основного сопла уменьшена таким образом, чтобы не изменился суммарный расход газа. Указанная доработка обеспечила устойчивость работы двигателя первого типа (см. рис. 2). Газодинамические характеристики продуктов сгорания и условия горения топлива остались прежними. На рис. 4 приведена схема РДТТ с дополнительными соплами в днище камеры сгорания, твердое топливо заштриховано, цифрами 1 и 2 указаны два дополнительных сопла

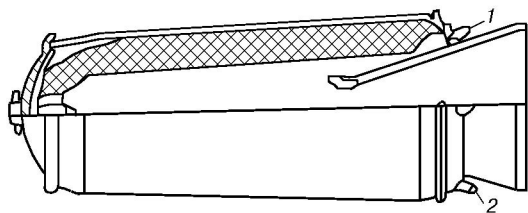


Рис. 4

(в сечении). Так как в окрестности дополнительных сопел в днище камеры наблюдается резкий поворот потока и, следовательно, полное отражение акустических волн [3], акустические свойства камеры не изменяются. 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 на рис. 3 и 4 конструктивных изменений в камере сгорания РДТТ на ликвидацию автоколебаний в газовой полости нельзя объяснить неустойчивостью горения топлива, но можно объяснить наличием в камере гидродинамических источников акустических колебаний, появление которых обусловлено гидродинамической неустойчивостью основного потока. Цель настоящей работы — определение типа гидродинамической неустойчивости, соответствующей источнику автоколебаний.

**Эффект перескока частоты.** Геометрия газовой полости камеры сгорания РДТТ не фиксирована. Из-за выгорания твердого топлива, которое служит одной из границ полости, газовая полость расширяется (или удлиняется) со временем. Для исследуемых в работе типов РДТТ газовая полость расширяется с сохранением своей длины. В процессе работы двигателя первого типа (см. рис. 2) наблюдался перескок частоты автоколебаний. Осциллограмма давления в газовой полости камеры сгорания этого РДТТ показана на рис. 5. В начале работы РДТТ автоколебания происходили на частоте первой продольной моды (рис. 5, А).

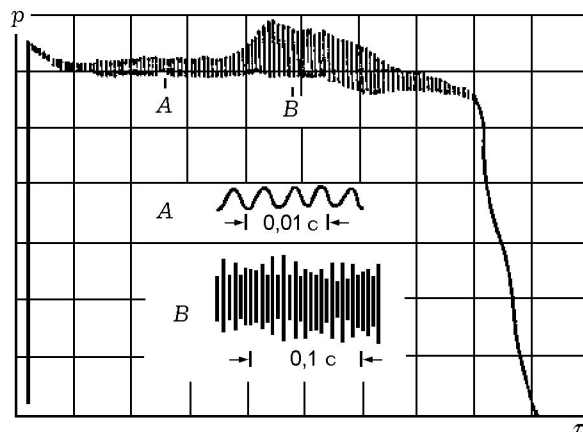


Рис. 5

В процессе работы частота автоколебаний удваивалась, наблюдался перескок частоты — автоколебания происходили на второй продольной моде собственных акустических колебаний газовой полости (рис. 5, В).

В процессе работы указанных типов РДТТ частоты собственных акустических колебаний для продольных мод не изменяются, поэтому перескок частоты автоколебаний во времени можно объяснить только влиянием динамических изменений газовой полости на частоту источника акустических колебаний в камере сгорания двигателя. Необходимо отметить, что гипотеза о том, что источник акустических колебаний обусловлен вибрационным горением, не объясняет описанное явление.

**Лабораторные исследования.** Для проверки взаимодействия вихревых и акустических полей в газовой полости РДТТ была создана экспериментальная «механическая» модель камеры сгорания — РДТТ первого типа (см. рис. 2). Для таких же значений геометрических и режимных параметров были проведены численные исследования (см. [2]), а также натурные испытания и экспериментальные исследования, описанные выше. В механической модели вместо твердого топлива реальной камеры использовался пористый материал соответствующей формы, через который пропускался воздух. Интенсивность горения топлива моделировалась различными скоростями потока воздуха через пористые стенки. Газовую полость для различных времен работы РДТТ моделировали соответствующим выбором толщины и формы пористого материала. Принципиальная схема механической модели аналогична представленной на рис. 4 схеме реального двигателя (заштрихованная часть — пористый материал, дополнительные сопла отсутствуют). В [7] описаны аналогичные эксперименты, в которых исследовано влияние пористости и проницаемости материала, моделирующего твердое топливо, на устойчивость основного потока в модели РДТТ.

В результате лабораторных исследований моделей РДТТ, в которых горение моделировалось потоком газа через пористые стенки [2, 7], установлено, что источником низкочастотных акустических автоколебаний в «механической» модели камеры сгорания РДТТ является гидродинамическая неустойчивость основного потока газа. Необходимо отметить, что описан-

ные исследования не указывают конкретно тип или вид гидродинамической неустойчивости потока продуктов сгорания. Так как прямые исследования невозможны, анализ проводился косвенно, методом исключения возможных типов источников колебаний.

## 2. ИСТОЧНИКИ КОЛЕБАНИЙ В РДТТ

Автоколебания в газовой полости камеры сгорания двигателей на твердом топливе обусловлены наличием нелинейного источника и обратной акустической связью. Эта схема справедлива для любого типа автоколебаний. Энергия колебаний берется из кинетической энергии основного потока продуктов сгорания. Автоколебания возникают, когда частота собственных акустических колебаний газовой полости камеры сгорания попадает в «полосу захвата» нелинейного источника. Для эффективной борьбы с автоколебаниями необходимо определить источник колебаний и механизм его работы. Непосредственное изучение колебаний в газовой полости камеры сгорания двигателей твердого топлива в натуральных испытаниях и лабораторных экспериментах связано с рядом сложностей, поскольку газовая 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.

**Классификация источников колебаний.** Для более детального рассмотрения источники колебаний необходимо классифицировать: по механизму работы источника, по источникам энергии, типу точечного источника и виду основного процесса, который обуславливает колебания. Основными источниками энергии колебаний в РДТТ и ЖРД являются внутренняя энергия топлива и кинетическая энергия основного потока продуктов сгорания. В [8] содержится анализ источников колебаний, энергия которых обусловлена преимущественно внутренней энергией топлива, а вид процесса — нестационарное или вибрационное горение. Механизм этих источников исследован в [9]. Анализ гидродинамических источников колебаний проведен в [6]. В этом случае источником энергии колебаний является кинетическая энергия основного потока продуктов сгорания, а тип источника определен гидродинамической неустойчивостью потока в газовой полости.

Возможные источники автоколебаний в РДТТ

Источник энергии		Вид неустойчивости	Тип источника	Механизм	Обратная связь
1	Внутренняя энергия топлива	Вибрационное горение	Монополь, квадруполь	Периодическая интенсификация горения	Взаимодействие с акустическими колебаниями полости
2	Основной поток	Турбулентность	Квадруполь	Конвективное нарастание	— // —
3	Основной поток	Мелкомасштабные вихри	Диполь, квадруполь	— // —	— // —
4	Основной поток	Конвективная неустойчивость потока	— // —	— // —	— // —
5	Основной поток	Неустойчивость контактных разрывов	— // —	Нарастание со временем	— // —

Для определения источника автоколебаний в РДТТ удобно использовать метод выборки. Возможные типы источников колебаний представлены в таблице.

Влияние еще одного фактора — структуры потока продуктов сгорания — на интенсификацию горения в настоящей работе рассматривается как разновидность вибрационного горения [9]. Поэтому источники колебаний, обусловленные влиянием потока на горение, учтены в первой строке таблицы.

**Акустические автоколебания в резонансных полостях.** Процесс возникновения автоколебаний и их математические модели хорошо исследованы [10]. Для возникновения интенсивных акустических автоколебаний в газовой полости камеры сгорания РДТТ необходимо, чтобы резонансная частота камеры попала в полосу захвата частот нелинейного источника и чтобы мода собственных (резонансных) колебаний не была ортогональна источнику. Последнее необходимо для возникновения акустической обратной связи «источник — газовая полость». Общая схема порождения акустических автоколебаний в резонансных полостях показана на диаграмме (рис. 6).

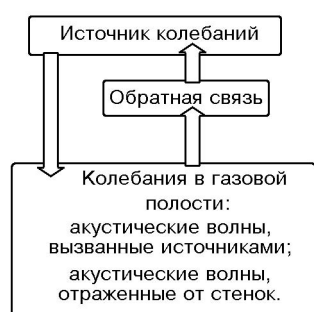


Рис. 6

Подавление или затягивание автоколебаний в РДТТ происходит при нарушении или ослаблении связей, указанных на диаграмме. Для подавления колебаний необходимо либо ослабить, ликвидировать или отстроить от резонансной частоты газовой полости источник колебаний, либо ослабить обратную связь за счет увеличения звукопоглощающих свойств камеры сгорания. Описанные выше результаты натуральных и модельных исследований позволяют методом исключения определить действительный источник автоколебаний в РДТТ исследуемого типа.

**Вибрационное горение.** В этом случае источником энергии колебаний является внутренняя энергия топлива. Точечным источником акустических колебаний, вызванных вибрационным горением, могут быть только монополь и квадруполь. Механизм колебаний, обусловленных вибрационным горением, изложен в [9]. Необходимо отметить, что описанные в предыдущем пункте натурные и экспериментальные исследования подтверждают тот факт, что вибрационное горение не вызывает акустических автоколебаний в камере сгорания РДТТ исследуемого типа. В самом деле, конструктивные доработки в окрестности входной кромки сопла, показанные на рис. 3, не изменяют условий горения топлива в газовой полости РДТТ и слабо влияют на изменение акустических резонансных свойств камеры сгорания, но подавляют или затягивают автоколебания в РДТТ.

Отверстия в днище камеры сгорания не меняют условий горения топлива и тем самым не изменяют возможный источник колебаний. Дополнительные сопла в днище камеры сгорания РДТТ не влияют на ее акустические ре-

зональные свойства, так как в окрестности сопел имеет место сильная рефракция акустических волн на основном потоке и их полное отражение. Поэтому из анализа диаграммы (см. рис. 6) подавление колебаний в РДТТ с дополнительными соплами в днище нельзя объяснить вибрационным горением.

Конструкция РДТТ и расположение твердого топлива рассчитаны так, что давление в камере сгорания в процессе ее работы не меняется. Это означает, что все газодинамические параметры продуктов сгорания постоянны во время работы РДТТ. Как было отмечено выше, частоты продольных мод собственных колебаний также не изменяются в процессе работы РДТТ. Поэтому перескок частоты автоколебаний во время работы РДТТ невозможно объяснить вибрационным горением.

В силу вышеизложенного можно утверждать, что в РДТТ нет вибрационного горения, по крайней мере в типовых конструкциях, приведенных на рис. 2, и первую строку в таблице можно вычеркнуть из списка предполагаемых источников автоколебаний в РДТТ.

Необходимо заметить, что природа источников акустических колебаний в РДТТ, указанных в строках 2–5 таблицы, является гидродинамической и колебания обусловлены неустойчивостью основного потока продуктов сгорания. Повышенный интерес к гидродинамическим источникам акустической энергии в камерах сгорания объясняется тем, что их мощность в случаях акустического резонанса соизмерима с общей мощностью РДТТ. На рис. 1 и 2 приведены примеры, в которых мощность развитых колебаний достигает 10 % мощности РДТТ.

Лабораторные исследования «механических» моделей газовой полости подтверждают, что гидродинамическая неустойчивость основного потока продуктов сгорания может быть источником автоколебаний в РДТТ.

**Мелкомасштабные вихревые структуры и турбулентность.** В силу больших значений чисел Рейнольдса и специфики геометрии камеры и процессов в ней поток продуктов сгорания неоднородный и турбулентный. Своеобразная форма заряда твердого топлива (см. рис. 2, 4) обуславливает появление мелкомасштабных вихревых структур в основном потоке продуктов сгорания [6, 11]. Турбулентность и вихревые структуры являются источниками широкополосного шума [12] квадрупольного типа.

Турбулентность и слабая завихренность акустически прозрачны [12], это означает, что в рамках линейного приближения акустические волны не взаимодействуют со слабыми вихрями и турбулентностью.

Конструктивные доработки, показанные на рис. 3 и 4 для двух рассматриваемых типов РДТТ, не изменяют акустических резонансных свойств камеры сгорания РДТТ и не могут влиять на турбулентность и мелкомасштабные вихревые структуры основного потока. Следовательно, они не влияют и на источник акустических колебаний. Так как эти доработки подавляют или затягивают автоколебания, из анализа следует, что турбулентность основного потока и мелкомасштабные вихревые структуры не могут служить источниками автоколебаний в РДТТ исследуемого вида. Поэтому вторую и третью строки в таблице можно вычеркнуть из списка возможных источников колебаний в газовой полости РДТТ.

**Пространственная гидродинамическая неустойчивость основного потока продуктов сгорания.** Широко распространено моделирование потока продуктов сгорания в газовой полости в некоторый фиксированный момент времени при помощи механической аналогии — потока вязкой жидкости в полубесконечном канале с пористыми стенками, жидкость вдувается через стенки. Для плоскопараллельных движений в таком канале можно построить точное решение задачи, описывающей основной поток [13]. Для больших значений числа Рейнольдса поле скоростей потока приближенно описывается при помощи аналитических выражений

$$u = \frac{\pi x}{2} \cos\left(\frac{\pi y}{2}\right), \quad v = -\sin\left(\frac{\pi y}{2}\right). \quad (2.1)$$

Здесь  $u, v$  — компоненты скорости по оси ординат (оси канала) и абсцисс,  $x, y$  — безразмерные декартовы координаты, боковые стенки канала  $\{(x, y) : 0 \leq x, -1 \leq y \leq 1\}$  являются пористыми, головная часть — твердой.

Исследование гидродинамической устойчивости течения вида (2.1) в плоском канале при втекании вязкой несжимаемой жидкости через пористые, проницаемые параллельные стенки впервые было выполнено с использованием модифицированного уравнения Ора — Зоммерфельда в работе [13]. Теоретические и экспериментальные исследования конвективной (или пространственной) неустойчивости потока в канале с пористыми стенками проведены в работах [7, 14], в которых можно

найти дальнейшую библиографию. В указанных работах известными методами [15, 16] изучалась устойчивость основного потока в канале с пористыми стенками; показано, что слабое возмущение основного потока нарастает вдоль оси канала, основной поток газа в таком канале описывается точным решением соответствующей краевой задачи [13]. Эти исследования могут объяснить возникновение автоколебаний в РДТТ рассматриваемого типа [7, 14], но не могут объяснить эффективность описанных доработок для подавления или затягивания автоколебаний в РДТТ.

Все описанные выше конструктивные доработки камеры сгорания РДТТ изменяют структуру основного потока продуктов сгорания в газовой полости только в окрестности сопла и не изменяют ее в канале заряда твердого топлива. Поэтому разделительная решетка, разделительные козырьки (см. рис. 3) и дополнительные сопла в днище камеры сгорания (см. рис. 4) не влияют на конвективную (пространственную) неустойчивость потока продуктов сгорания.

Из анализа диаграммы (см. рис. 6) следует, что конвективная (пространственная) неустойчивость основного потока продуктов сгорания в качестве источника автоколебаний не может объяснить влияние описанных выше конструктивных доработок на подавление колебаний в газовой полости РДТТ. Четвертую строку таблицы также можно исключить из списка возможных источников автоколебаний в РДТТ.

**Неустойчивость крупномасштабных вихревых структур.** Компактные вихревые структуры гидродинамически неустойчивы и служат источниками акустических колебаний. Вид или тип неустойчивости компактных вихревых структур зависит от конкретных условий течения. Как отмечалось выше, существование крупномасштабных вихревых структур в потоке продуктов сгорания в газовой полости РДТТ можно доказать только на основе косвенных данных. Таковыми, в частности, являются описанные выше результаты после доработки камеры сгорания, которая позволила затянуть или ликвидировать автоколебания в газовой полости РДТТ.

В самом деле, если источник колебаний в РДТТ обусловлен гидродинамической неустойчивостью крупномасштабных вихревых структур в основном потоке продуктов сгорания,

то эффективность подавления или затягивания автоколебаний с использованием всех описанных выше конструктивных доработок для обоих типов РДТТ объясняется влиянием этих доработок на крупномасштабные вихревые структуры в районе днища и утопленного сопла РДТТ.

Наибольшее влияние разделительные решетки и козырьки оказывают на вид основного потока газа в окрестности сопла камеры сгорания. Деформация линий тока приводит к изменению характерных размеров контактных разрывов и застойных зон в камерах. Это, в свою очередь, приводит к сдвигу 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 камере сгорания не возникают [1].

Изменение размеров газовой полости в процессе работы РДТТ позволяет объяснить перескок частоты автоколебаний (см. рис. 5) в случае, когда источником колебаний является гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур. В самом деле, частота автоколебаний в различное время работы РДТТ может быть представлена в виде [6]

$$f_t = \text{Sh} \frac{v}{d_t} N_t, \quad t = 1, 2. \quad (2.2)$$

Здесь  $\text{Sh}$  — число Струхала,  $v$  — характерная скорость в газовой полости,  $d_t$  — характерный размер крупномасштабной вихревой структуры, индекс  $t$  указывает момент времени работы РДТТ,  $N_t$  — натуральное число. В процессе работы РДТТ твердое топливо выгорает и размеры вихревой структуры изменяются:  $d_2 = (1 + \varepsilon^2)d_1$  (здесь и далее  $\varepsilon$  — безразмерный параметр). Пусть частота автоколебаний  $f_1$  в газовой полости в момент времени  $t = 2$  «перескакивает» и становится в два раза выше:  $f_2 = 2f_1$ . Тогда из (2.2) следует уравнение  $2N_1(1 + \varepsilon^2) = N_2$ . Решение этого уравнения относительно  $N_2$  в натуральных числах существует: например, если  $\varepsilon^2 = 1/2$ , то  $N_2 = 3N_1$ .

Несмотря на то, что в лабораторных исследованиях «механических» моделей камеры сгорания РДТТ структура потока продуктов сгорания в газовой полости не изучалась, эти исследования подтверждают, что источ-

ником низкочастотных акустических колебаний в РДТТ может быть гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур основного потока продуктов сгорания в газовой полости.

Итак, известные натурные испытания и экспериментальные исследования показывают, что источником автоколебаний в камерах сгорания РДТТ исследуемого типа является гидродинамическая неустойчивость крупномасштабных вихревых структур в газовой полости.

### 3. СТРУКТУРА ПОТОКА В ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ РДТТ

Проведенные в предыдущем параграфе качественные исследования указывают источник автоколебаний в газовой полости РДТТ. В практических приложениях необходимо предсказывать частоту автоколебаний и прогнозировать устойчивость работы как для реальных РДТТ, так и для РДТТ на стадии проектирования. Для этого качественных исследований недостаточно. Чтобы описать источник колебаний, обусловленный гидродинамической неустойчивостью потока продуктов сгорания, необходимо знать структуру течения в газовой полости РДТТ. Так как прямые исследования потока продуктов сгорания в газовой полости РДТТ невозможны, существенное значение приобретают аналитические и численные методы.

Методы исследования стационарной динамики продуктов сгорания, целью которых являются интегральные характеристики РДТТ, хорошо развиты. Как правило, в этих методах заранее исключается или не учитывается вихревая структура основного потока продуктов сгорания в газовой полости. Для исследования устойчивости работы РДТТ необходимо учитывать тонкую структуру потока продуктов сгорания — пространственную неоднородность и образование крупномасштабных вихревых структур [6], поэтому обычные методы исследования стационарных потоков в газовых полостях РДТТ непригодны или требуют специальной модификации.

Авторам известны три основных подхода к изучению тонкой структуры потока продуктов сгорания в газовой полости РДТТ: исследование вихревой структуры численными методами на основе уравнений Навье — Стокса [2]; численные методы исследования вихре-

вой структуры при помощи уравнений невязкого газа [7]; аналитические методы, точное решение для механической аналогии [13].

**Численные методы.** Исследования тонкой структуры потока продуктов сгорания в РДТТ, основанные на численных методах, отличаются выбором математической модели. Это важно для описания крупномасштабных вихревых структур в газовой полости РДТТ.

Исследование основного потока газа при помощи краевых задач для уравнения Навье — Стокса проведено в работе [2], где показано существование в основном потоке газа крупномасштабных вихревых структур в окрестности днища камеры сгорания и утолщенного сопла.

Крупномасштабные вихревые структуры в газовой полости РДТТ при помощи краевых задач для уравнений движения идеального газа исследованы в серии работ, проведенных под руководством академика РАН А. Ф. Сидорова. В [17–20] даны описания различных методов расчета, обоснование и примеры численных исследований, а также библиография по этому вопросу.

Для настоящей работы важно то, что различными методами численных исследований потока продуктов сгорания достоверно доказано существование крупномасштабных вихревых структур в застойных зонах газовой полости РДТТ.

По разработанной методике авторами проведен расчет полей скоростей и давлений в газовой полости РДТТ с зарядом конусной формы, прочно скрепленным с корпусом. Результаты расчетов параметров основного потока в окрестности утолщенного сопла представлены на рис. 7 в виде изолиний функций тока. Анализ расчетов показывает, что замкнутые вихревые потоки образуются в зоне между боковой поверхностью канала заряда и утолщенным соплом, а также в районе переднего днища.

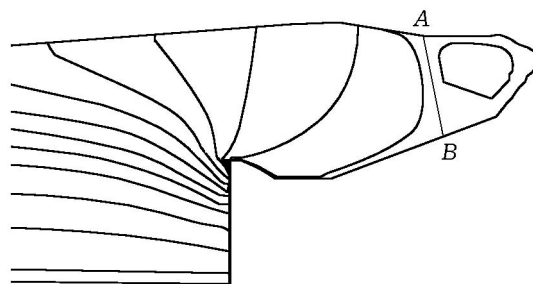


Рис. 7



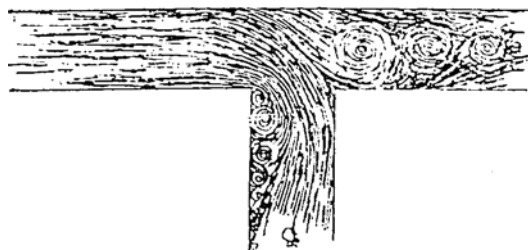


Рис. 8

В головной части вихрь обусловлен входными параметрами газа с горящей поверхности заряда, а в хвостовой части — геометрией области и степенью утопленности сопла. В результате численных исследований обнаружено, что при увеличении скорости и уменьшении плотности вдвухаемого газа на 10 % по сравнению с исходными данными вихрь в головной части исчезает.

На основании численных исследований потока продуктов сгорания можно утверждать, что в окрестности днища камеры и утопленного сопла образуются крупномасштабные вихревые структуры в застойных зонах (см. рис. 7). Это утверждение косвенно подтверждается данными экспериментальных исследований структуры потока в тупиковой полости (рис. 8).

#### 4. МЕХАНИКА ИСТОЧНИКА КОЛЕБАНИЙ

Известно, что крупномасштабные вихревые структуры гидродинамически неустойчивы. Численные данные о поле скоростей в газовой полости камеры сгорания позволяют определить частоты, обусловленные гидродинамической неустойчивостью контактного разрыва между потенциальным и вихревым течениями в камере или неустойчивостью компактного вихревого образования в целом. Этот тип неустойчивости связан с периодической деформацией компактной вихревой структуры [21]. Поскольку геометрия газовой полости камеры сгорания в окрестности днища сложна, а скорость основного потока газа в камере меняется от тысячных долей числа Маха до единицы, определение характерных скоростей и размеров в формуле  $Sh = f d/v$  представляет собой специальную задачу.

**Неустойчивость контактного разрыва.** Период источника колебаний, обусловленного гидродинамической неустойчивостью контактного

разрыва или деформацией вихревой структуры в застойной зоне, можно определить временем прохождения малого возмущения вдоль линии контактного разрыва. Из анализа поля скоростей основного потока газа в камере сгорания, полученного в численных исследованиях, можно найти период и частоту колебаний, обусловленных гидродинамической неустойчивостью контактного разрыва между вихревым и потенциальным течениями.

На рис. 7 показаны линии тока основного потока продуктов сгорания в газовой полости РДТТ, линия  $AB$  означает контактный разрыв между вихревым и потенциальным течениями. Так как перенос малых гидродинамических возмущений (слабых вихрей или малой деформации вихревой структуры) [12] происходит со скоростью основного потока (конвективный перенос), время переноса вихревого возмущения вдоль линии контактного разрыва определяется по формуле

$$T_c = \int dt = \int_A^B \frac{dl}{v(l)} = \sum_k \frac{dl_k}{v_k}. \quad (4.1)$$

Здесь  $dl_k$  — элемент длины линии  $AB$ ,  $v_k$  — скорость газа на интервале  $dl_k$ , полученные численно. Период колебаний определяется временем  $T_c$  переноса возмущения от точки  $A$  к точке  $B$  по линии контактного разрыва  $AB$ . Значение  $T_c$ , определенное по формуле (4.1), в 15 раз расходитя с натурными и экспериментальными данными. Другие способы вычисления частоты и числа Струхала при помощи различных модификаций соотношения (4.1) дают значения  $Sh \approx 5 \div 20$ , что неудовлетворительно с точки зрения физики и механики исследуемого явления. Следовательно, гидродинамическая неустойчивость контактного разрыва (или деформация компактной вихревой структуры в застойной зоне) не является источником автоколебаний в РДТТ исследуемых типов.

Необходимо отметить, что компактные крупномасштабные вихревые структуры имеют множество типов гидродинамической неустойчивости деформационного вида, подробно они исследованы, например, в работах [21, 22], где можно найти библиографию по этому вопросу.

**Структурная перестройка течения в застойной зоне.** Численные исследования структуры потока продуктов сгорания в газовой полости

РДТТ позволяют утверждать, что в окрестности утолщенного сопла и днища камеры сгорания — в тупиковой полости — образуется застойная зона (см. рис. 7). Исследования структуры течения в тупиковой полости (застойной зоне) обусловлены техническими потребностями, связанными с транспортировкой газообразных и жидких сплошных сред по каналам и трубопроводам, и имеют давнюю историю. Пример линий тока в застойной зоне, определяемой тупиковой полостью, приведен на рис. 8, который принадлежит Леонардо да Винчи [23]. Следуя [24], можно считать, что колебания в камере сгорания обусловлены неустойчивостью и периодическим перестроением крупномасштабных вихревых структур в застойной зоне камеры сгорания (см. рис. 7, 8). В этом случае параметры, входящие в выражение  $Sh = f d/v$ , можно определить следующим образом:  $v$  — среднерасходная скорость потока газа на входе в сопло,  $d$  — характерный размер контактного разрыва (длина линии  $AB$ ) [24]. Для указанных параметров

$$Sh = f d/v \approx 0,2. \quad (4.2)$$

Это значение числа Струхалея вполне удовлетворительно и позволяет выявить механизм автоколебаний в РДТТ. Следуя [24], можно утверждать, что акустические колебания в камерах сгорания РДТТ (см. рис. 2) определяются периодической перестройкой крупномасштабных вихревых структур в застойной зоне около сопла и днища камеры. Это означает, что количество и вид крупномасштабных вихревых структур в застойной зоне (тупиковой полости, рис. 8) меняется периодически по времени.

Автоколебания в РДТТ возникают в том случае, когда акустические резонансные частоты газовой полости РДТТ попадают в полосу захвата частот источника, определяемых перестройкой крупномасштабных вихревых структур в застойных зонах потока продуктов сгорания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что в газовой полости РДТТ в окрестности днища около утолщенного сопла возникают крупномасштабные вихревые структуры потока продуктов сгорания, которые в силу своей неустойчивости порождают гидродинамический источник акустических колебаний.

Утолщенное сопло перераспределяет поток и влияет на образование и распад крупномасштабных вихрей. В головной части газовой полости РДТТ крупномасштабный вихрь обусловлен входными параметрами продуктов сгорания с горячей поверхности заряда. Автоколебания в исследуемых РДТТ вызваны гидродинамической неустойчивостью, связанной с периодической по времени перестройкой крупномасштабных вихревых структур около днища.

В рассмотренных РДТТ наиболее эффективны следующие средства предотвращения автоколебаний: размещение в газовой полости динамического резонансного поглотителя колебаний для ослабления обратной акустической связи; изменение частоты колебаний источника при помощи разделителей потока в окрестности сопла; изменение крупномасштабных вихревых структур при помощи дополнительных сопел в днище камеры сгорания; изменение глубины застойной зоны (тупиковой полости).

Необходимо отметить, что целесообразно ликвидировать колебания на стадии их зарождения, пока их можно считать акустически.

Авторы посвящают свою работу памяти Л. Н. Козлова и А. Ф. Сидорова.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф. Гидродинамические источники колебаний в камерах сгорания // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 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. и др. Подавление акустических колебаний в камерах сгорания резонансными поглотителями. М.: Информ ТЭИ, 1991. С. 48.
4. Сухинин С. В., Ахмадеев В. Ф. Оптимизация поглотителя колебаний в камере сгорания // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 5. С. 79–88.
5. Sukhinin S. V., Akhmadeev V. F. Strouhal numbers of internal flow in a combustion chamber // Trans. Intern. Symp. Actual Problems of Physical Hydroaerodynamics, Novosibirsk, Russia, 19–23 April 1999. P. II-114.
6. Ахмадеев В. Ф., Гусева Г. И., Козлов Л. Н. и др. Гидродинамические источники акустических колебаний в камерах сгорания. М.: ЦНИИТИ КПК, 1990.
7. Casalis G., Avalon G., Pineau J.-Ph. Spatial instability of planar channel flow with fluid

- injection through porous walls // *Phys. Fluids*. 1998. V. 10, N 10. P. 2558–2568.
8. **Неустойчивость** горения в ЖРД / Под ред. Д. Т. Харье, Ф. Г. Рирдона. М.: Мир, 1975.
  9. **Раушенбах Б. В.** Вибрационное горение. М.: ГИФМЛ, 1961.
  10. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э.** Теория колебаний. М.: Наука, 1981.
  11. **Flandro G. A.** Vortex driving mechanism in oscillatory rocket flows // *J. Propulsion*. 1985. V. 2, N 3.
  12. **Блохинцев Д. И.** Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981.
  13. **Варапаев В. Н., Ягодкин В. И.** Устойчивость течения в канале с пористыми стенками // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1969. V. 4, № 5.
  14. **Avalon G., Casalis G., Griffond J.** Flow instabilities and acoustic resonance of channel with wall injection // *AIAA Paper* № 98-3218. 1998. P. 1–11.
  15. **Джозеф Д.** Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981.
  16. **Гидродинамические** неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Х. Суинни, Дж. Голлаба. М.: Мир, 1984.
  17. **Хайруллина О. Б.** Моделирование вихревых течений газа в каналах сложных конфигураций. Екатеринбург, 1997. (Препр. / Уральское отд-ние. ИММ; № 154).
  18. **Ахмадеев В. Ф., Аликин В. Н., Суряков В. А.** Исследование параметров течений вязких несжимаемых жидкостей в трубах сложного сечения // Тез. II Всесоюз. симпоз. по механической переработке полимерных материалов. Пермь, 1980.
  19. **Ахмадеев В. Ф., Сидоров А. Ф., Спиридонов Ф. Ф., Хайруллина О. Б.** О трех методах численного моделирования дозвуковых течений в осесимметричных каналах сложной формы // *Моделирование в механике*. Новосибирск: ВЦ и ИТПМ СО АН СССР, 1990. Т. 4(21), № 5. С. 15–25.
  20. **Ахмадеев В. Ф.** Численные исследования течений вязкой жидкости в каналах сложной формы методом конечных элементов // *Моделирование в механике*. Новосибирск: ВЦ и ИТПМ СО АН СССР, 1990. Т. 4 (21), № 3. С. 8–12.
  21. **Kopiev V. F., Chernyshev S. A.** Vortex ring eigen-oscillation as a source of sound // *J. Fluid Mech*. 1997. V. 341. P. 19–57.
  22. **Копьев В. Ф., Чернышев С. А.** О возможности интенсификации излучения звука крупномасштабным вихрем в слабом пространственном неоднородном внешнем поле // *Акуст. журн*. 1998. Т. 44, № 3. С. 378–384.
  23. **Fluid mechanics of internal flow** // *Proc. Symp. on the Fluid Mechanics of Internal Flow*. General Motors Research Laboratories. Warren, Michigan, 1965 / Gino Sovran (Ed.). New York: Elsevier Publishing Company, 1967.
  24. **Вишняков В. А., Засецкий В. Г., Каравосов Р. К. и др.** Возбуждение интенсивных пульсаций давления при повороте потока в тракте с тупиковой полостью // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1998. № 2. С. 104–111.

*Поступила в редакцию 1/IX 1999 г.*