

УДК 536.244

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ ВОЗДУХ + ЭТАНОЛ В РЕЗОНАНСНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

К. Ю. Арефьев^{1,2}, А. В. Воронежский², М. А. Ильченко¹, С. А. Сучков²

¹Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва
arefyev@ciam.ru, 012@ciam.ru

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
voron@bmstu.ru, sergeas67@gmail.com

Приведены математическая модель, описание лабораторной установки и результаты расчетно-экспериментального исследования особенностей двухфазного нестационарного течения в проточном тракте резонансной газодинамической системы (РГС) при использовании топливной композиции воздух + этанол. Выявлены основные закономерности процесса воспламенения топливной смеси внутри резонансной полости. Определены режимные условия воспламенения и проведена оценка периода задержки воспламенения топливной композиции в РГС. Полученные данные могут быть использованы для моделирования физико-химических процессов и выбора режимов подачи жидкого горючего, удовлетворяющих условиям воспламенения двухфазных топливных смесей в РГС.

Ключевые слова: двухфазное течение, газодинамическое воспламенение, дробление капель, испарение капель, резонансная газодинамическая система.

DOI 10.15372/FGV20170403

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективных и надежных генераторов высокоэнтальпийных потоков является важной и актуальной задачей в энергетической, авиационно-космической и других отраслях промышленности. Как отмечалось в [1], к таким генераторам можно отнести ракетные и воздушно-реактивные двигатели, энергоустановки, высокопроизводительные эжекторы, огневые подогреватели воздушного потока, технологические устройства для напыления покрытий и резки металлов, а также другие энергосиловые и технологические системы. Компонентами топлива генератора высокоэнтальпийных потоков могут быть различные виды жидкого горючего (этанол, керосин, биотопливо и др.) в сочетании с газообразным окислителем (кислород, воздух, закись азота и др.). Из [2, 3] известно, что для генераторов высокоэнтальпийных потоков рассматривается создание неэлектрической системы воспламенения, которая будет способна обеспечить многократ-

ный запуск генератора с приемлемым временным интервалом выхода на номинальный режим и повышенной надежностью. В этом случае могут быть использованы воспламенители с резонансной газодинамической системой (РГС) [1, 4–6]. Основными элементами РГС являются сверхзвуковое сопло и резонатор. Интенсивный нагрев и воспламенение подаваемой через сопло топливной смеси осуществляются в застойной зоне резонансной полости за счет реализации самоподдерживающегося циклического процесса прохождения и отражения ударных волн от торцевой поверхности резонатора [4, 5, 7]. РГС имеет ряд преимуществ, в том числе отсутствие необходимости в первичном подогреве элементов конструкции и компонентов топлива, использование кинетической энергии сжатого потока для его нагрева и воспламенения, отсутствие дополнительных внешних источников энергии, существенное упрощение конструкции и повышение показателей надежности системы воспламенения.

В более ранних работах [4–6] применение РГС рассматривалось в первую очередь для газообразных топливных смесей. В настоящее время определенный интерес представляет создание РГС, в которых горючее подает-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01118).

© Арефьев К. Ю., Воронежский А. В., Ильченко М. А., Сучков С. А., 2017.

ся в жидком состоянии, а окислитель — в газообразном. Существующие методы воспламенения жидкого горючего на внешней поверхности резонатора [8] имеют ограниченное применение, поскольку они малоэффективны и для них характерно достаточно длительное время задержки воспламенения. С учетом этого наиболее перспективным направлением является создание РГС с объемным воспламенением двухфазной топливной композиции внутри резонансной полости.

Схема одного из возможных вариантов РГС в составе генератора высокоэнтальпийных потоков на двухфазных компонентах топлива представлена на рис. 1. РГС состоит из сверхзвукового сопла 1 с расположенной по его оси струйной форсункой 2, из резонатора 3, форсуночной головки генератора 4, камеры сгорания генератора 5. Для управления работой системы используются клапаны горючего 6, 8 и окислителя 7.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований [1, 7, 9] показали, что при надлежащем профилировании газодинамического тракта РГС подаваемый через сопло окислитель может быть нагрет в застойной зоне полости резонатора до высокой температуры (более 2000 К). При подаче жидкого горючего через струйную форсунку в периодической ударно-

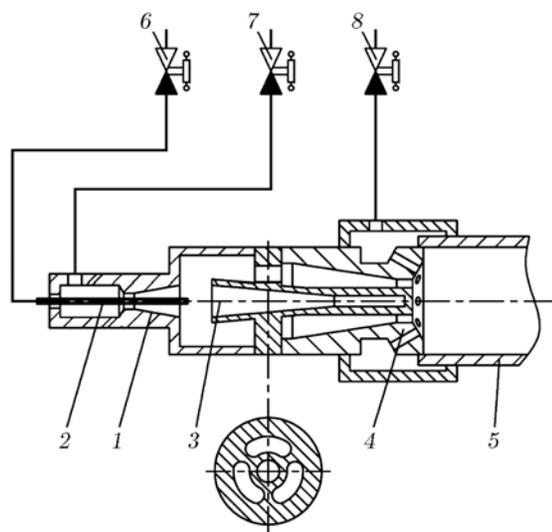


Рис. 1. Конструктивная схема РГС в составе генератора высокоэнтальпийных потоков:

1 — сопло РГС, 2 — струйная форсунка подачи горючего, 3 — резонатор, 4 — форсуночная головка генератора, 5 — камера сгорания генератора, 6, 8 — клапаны горючего, 7 — клапан окислителя

волновой структуре между соплом и резонатором РГС происходит интенсивное дробление струи жидкости, в результате чего образуются капли различных размеров. Капли попадают в застойную зону резонансной полости, где они испаряются и затем воспламеняются. Высокотемпературные продукты сгорания попадают в камеру сгорания генератора высокоэнтальпийных потоков, где инициируют основной рабочий процесс. После этого в камеру поступает горючее через форсуночную головку генератора, а подача горючего через струйную форсунку прекращается. В качестве горючего могут быть использованы различные жидкие углеводородные соединения (этанол, керосин, биотопливо и др.), а в качестве окислителя — газообразные кислород, воздух, закись азота и др.

Статья посвящена расчетно-экспериментальному исследованию процесса воспламенения двухфазной топливной композиции воздух + этанол в резонансной полости РГС, определению режимных условий воспламенения и периода задержки воспламенения рассматриваемой топливной композиции.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель, используемая для решения задач нестационарного течения со сложной ударно-волновой структурой, интенсивными высокочастотными пульсациями давления в застойной зоне резонансной полости РГС и наличием капель жидкости, основана на комбинированном методе Лагранжа — Эйлера. Для описания химических реакций используется брутто-реакция, поэтому число газообразных компонентов ограничено тремя: воздух, испаренное горючее и продукты сгорания. В рассматриваемой постановке химическое взаимодействие считается необратимым и протекает по следующей схеме: воздух + испаренное горючее → продукты сгорания. В данном случае под продуктами сгорания понимается термодинамически равновесная смесь газов, образующаяся в результате взаимодействия горючего с окислителем.

Для определения параметров течения используется система нестационарных уравнений Навье — Стокса в осесимметричной постановке [10]. Для моделирования взаимодействия капель жидкости с газом в уравнения сохранения вещества, импульса и энергии введены источникные члены, значение которых в каждой точке пространства определяется из решения

методом Лагранжа сопряженной задачи движения, дробления и испарения частиц.

Вычисление осевой и радиальной составляющих вектора скорости капель в газовом потоке проводится путем интегрирования дифференциальных уравнений движения [10]. Для описания процесса потери массы капель при газодинамическом ее дроблении использована полуэмпирическая модель срыва частиц (вторичных капель) с поверхности капли [11–13]. В работе предполагается, что вторичные капли не коагулируют в силу низкой плотности их распределения. При этом сделано допущение, что скорость и температура вторичных капель совпадают со скоростью и температурой газа. В случае нагрева до температуры испарения вторичные капли испаряются полностью.

Процесс нагрева и последующего испарения первичных капель осуществляется посредством конвективного теплопереноса [11, 14]. При этом возможные режимы объемного парообразования, приводящие к интенсивной массопотере капли, не рассматриваются.

Для расчета процессов воспламенения и горения наиболее часто используются уравнения переноса и химической кинетики [15–17]. Однако следует отметить, что такой подход требует моделирования многостадийных прямых и обратных химических реакций. Современные алгоритмы совместного решения уравнений газовой динамики и химической кинетики в ряде случаев приводят как к неустойчивости расчетной схемы, так и к существенному повышению необходимых вычислительных ресурсов. Эти эффекты усугубляются наличием больших градиентов давления и скорости газодинамического течения, реализуемых в проточном тракте РГС. Кроме того, коэффициенты, используемые при расчете скорости редуцированных химических реакций, имеют ограниченное применение и могут давать существенные погрешности при расчете реагирующего течения в РГС.

В настоящей работе моделируется воспламенение и горение воздушно-этаноловой смеси исключительно в газовой фазе. Это обусловлено тем, что гетерогенное горение на поверхности легко испаряемых капель этанола во много раз менее интенсивное, чем газофазное, на что указывают данные, приведенные в работах [15, 18, 19]. Математическая модель учитывает, что процесс в РГС реализуется последовательно: сначала капли этанола дробятся и

испаряются в воздушном потоке, а затем образовавшаяся газовая смесь воспламеняется.

С учетом вышесказанного для оценки динамики процесса воспламенения разработан критериальный подход, базирующийся на понятии условного эффективного времени взаимодействия газофазных компонентов $\tilde{\tau}$ в каждом контрольном объеме расчетной области. В рамках предлагаемой модели принято, что если параметры в контрольном объеме соответствуют условиям воспламенения: $Y_{\min} \leq Y'_{\text{гор}} \leq Y_{\max}$ и $T \geq T_{\text{вос}}$, то сам момент воспламенения определяется равенством $\tilde{\tau} = \tau_{\text{инд}}$. Здесь $Y'_{\text{гор}} = Y_{\text{гор}} / (Y_{\text{гор}} + Y_{\text{в}})$, $Y_{\min} = 0.05$, $Y_{\max} = 0.35$ — соответственно нижний и верхний концентрационные пределы самовоспламенения этанола в воздухе, $Y_{\text{в}}$ — концентрация воздуха, $T_{\text{вос}} = 470$ К — температура самовоспламенения этанола с воздухом, $\tau_{\text{инд}}$ — период индукции.

В рассматриваемой физико-математической постановке при выполнении условий $Y_{\min} \leq Y_{\text{гор}} \leq Y_{\max}$ и $T \geq T_{\text{вос}}$ вычисление $\tilde{\tau}$ в каждой точке пространства (для осесимметричного случая) может быть основано на решении системы Навье — Стокса [10], дополненной уравнением, учитывающим перенос взаимодействующих компонентов:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\tau})}{\partial t} + u\frac{\partial(\rho\tilde{\tau})}{\partial x} + v\frac{\partial(\rho\tilde{\tau})}{\partial r} + \frac{1}{r}v\rho\tilde{\tau} = \rho S_{\tau}.$$

Здесь t — время, x , r — осевая и радиальная координаты, u , v — осевая и радиальная составляющие скорости газа, ρ — плотность газа, S_{τ} — источниковый член. В случае отсутствия катализаторов химических реакций в топливной смеси примем $S_{\tau} = 1$. Если перестают выполняться условия $Y_{\min} \leq Y_{\text{гор}} \leq Y_{\max}$ и $T \geq T_{\text{вос}}$, то в рассматриваемом контрольном объеме параметром $\tilde{\tau}$ можно пренебречь.

Следует отметить, что в общем случае период индукции зависит от концентрации горючего, температуры смеси и давления. Аппроксимация имеющихся эмпирических данных по горению испаренных спиртов [17, 20, 21] позволяет представить период задержки воспламенения этанола (который отсчитывается от момента испарения этанола до его воспламенения) в следующем виде:

$$\tau_{\text{инд}} = \tau_{\text{инд}}^0 \left(\frac{p}{p_{\text{атм}}} \right)^{-m} \left(\frac{T}{T_{\text{вос}}} \right)^{-n} \times \left(\frac{k_1}{Y'_{\text{гор}} - Y_{\min}} - \frac{k_2}{Y - Y'_{\text{гор}}} \right).$$

Здесь $\tau_{\text{инд}}^0$ — задержка воспламенения при стандартном атмосферном давлении $p_{\text{атм}}$ при температуре воспламенения, T , p — температура и давление газа, k_1 , k_2 — эмпирически полученные коэффициенты, m , n — показатели влияния давления и температуры соответственно. Аппроксимация представленных в [17, 20, 21] данных позволила получить для воспламенения паров этанола в воздухе следующие значения констант: $\tau_{\text{инд}}^0 = 35$ мс, $m = 0.74$, $n = 1.25$, $k_1 = 0.029$, $k_2 = 0.14$.

После воспламенения взаимодействие компонентов описывается моделью Шваба — Зельдовича [22]. При этом предполагается, что в контрольном объеме с воспламенившейся топливной смесью реализуется локальное термодинамическое равновесие (в соответствии с принятой брутто-реакцией) [23, 24]. При таком подходе не требуется введения дополнительных источников членов в уравнение сохранения энергии, так как все эффекты тепловыделения при воспламенении и горении учитываются с помощью моделирования термодинамического равновесия.

Сопоставление приведенных на рис. 2 результатов расчета и экспериментальных данных [17, 20, 21], полученных в установке постоянного объема с предварительно подготовленной смесью паров этанола и воздуха, показывает их удовлетворительное совпадение (различие по периоду задержки воспламенения не более 7 %).

Для решения представленной системы уравнений использован программный комплекс HyperFLOW 2D/3D. В расчетах применялись ортогональные расчетные сетки с общим количеством ячеек около $1.5 \cdot 10^6$.

В качестве граничных условий в расчетах задавали давление p_v и температуру T_0 воздуха на входе в сопло РГС, а также давление p_n окружающей среды. Начальная скорость каплей (образующихся в результате распада струи из форсунки) принята приближенно равной скорости жидкости в выходном сечении форсунки. Средний объемно-поверхностный диаметр каплей, образующихся при распыле жидкости из струйной форсунки, оценивался в соответствии с известными закономерностями [25].

Представленная математическая модель позволяет рассчитывать нестационарное газодинамическое течение с циклическими ударными волнами, оценивать параметры каплей эта-

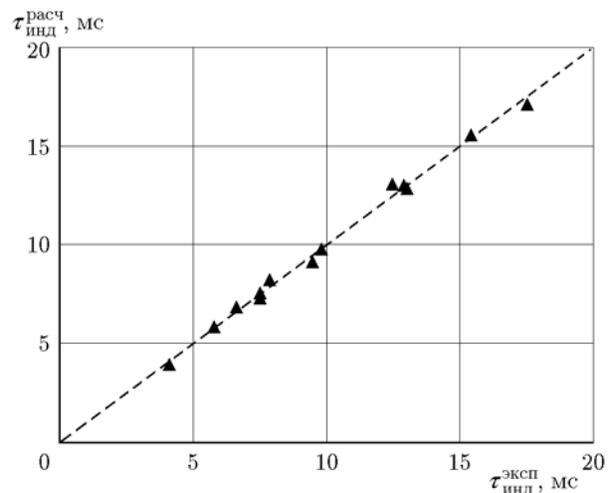


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных [17, 20, 21] значений периода задержки воспламенения

нола при их впрыске через струйную форсунку, а также моделировать процессы дробления и испарения каплей, включая воспламенение смеси паров этанола с воздухом в проточном тракте РГС.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Схема лабораторной установки для экспериментальных исследований приведена на рис. 3. Принцип работы установки заключается в следующем. Сжатый воздух находится в рампе высокого давления 1. С помощью газовых редукторов 2 и 14 устанавливается требуемое давление воздуха соответственно в системе наддува жидкого горючего (этанола) и перед соплом РГС. После открытия клапанов 12 и 13 воздух и этанол попадают в РГС 7. Измерение основных параметров осуществляется с помощью датчиков давления 5, 10 и термпары 11. Температура внешней поверхности резонатора определяется с помощью тепловизора 8. Для измерения спектральной характеристики пульсаций давления в РГС используются микрофон 6 и анализатор быстропеременных процессов 3.

Исследуемая РГС (рис. 4) состоит из корпуса 1, струйной форсунки 2 для подачи жидкости (этанола), сверхзвукового сопла 3, резонатора 4. Расположение форсунки перед соплом РГС выбрано на основе предварительных исследований [10] и обеспечивает максимальное тепловыделение в застойной зоне резонансной полости.

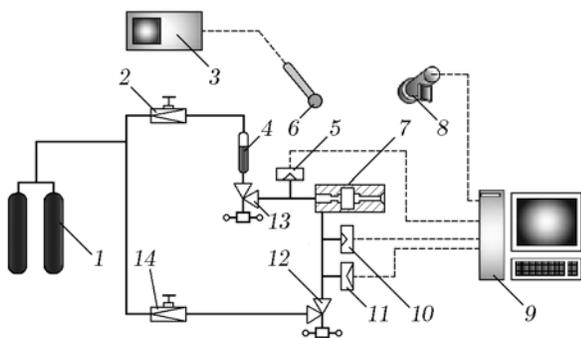


Рис. 3. Схема установки и системы измерений для экспериментального исследования РГС:

1 — рампа высокого давления, 2, 14 — газовые редукторы, 3 — анализатор быстропеременных процессов, 4 — емкость с этанолом, 5, 10 — датчики давления, 6 — микрофон, 7 — РГС, 8 — тепловизор, 9 — модуль сбора и обработки информации, 11 — термopара, 12, 13 — клапаны

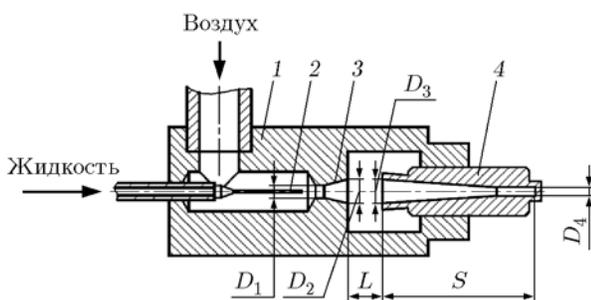


Рис. 4. Конструктивная схема РГС:

1 — корпус, 2 — форсунка, 3 — сверхзвуковое сопло, 4 — резонатор

На основе результатов расчетно-экспериментальных исследований [1, 7, 9] выбраны основные геометрические характеристики РГС: относительная глубина резонансной полости $S/D_1 = 13$, относительное расстояние между срезом сопла и входной кромкой резонатора $L/D_1 = 2$, относительные диаметры $D_2/D_1 = 2$, $D_3/D_1 = 2$, $D_4/D_1 = 0.7$. Такая конфигурация проточного тракта РГС соответствует геометрии, для которой получены максимальные значения тепловыделения в застойной зоне резонансной полости. Для получения необходимых характеристик распыла этанола и минимизации загромождения проточного тракта РГС относительный диаметр канала форсунки выбран равным $d_f/D_1 = 0.15$. Массовый расход жидкости (этанол) через форсунку находится в диапазоне $2 \div 5$ г/с. При этом в канале форсунки реализуются турбулентные

режимы течения с числами Рейнольдса $Re \leq 30000$. Расчеты показывают, что средние диаметры и скорости капель жидкости в факеле распыла форсунки составляют $16 \div 40$ мкм и $25 \div 65$ м/с соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Механизмы возбуждения автоколебательного процесса и нагрева газа в резонансной полости РГС детально представлены в работах [1, 4, 5, 7, 9, 26–28].

Характеристики интенсивности нагрева внешней поверхности резонатора рассматриваемой конфигурации исследовались в диапазоне относительного перепада давления в сопле РГС $p_B/p_H = 5 \div 35$. Результаты расчетов и экспериментов представлены на рис. 5. Отклонение расчетных значений относительной температуры T_p/T_0 (здесь T_p — температура внешней поверхности резонатора, T_0 — температура подаваемого воздуха) от эмпирических не превышает 12 % и обусловлено неучтенным теплоотводом в окружающую среду и элементы конструкции.

Из рис. 5 видно, что температура в резонаторе РГС растет с повышением относительного перепада в области $p_B/p_H < 28$. Дальнейшее увеличение относительного перепада давления приводит к резкому снижению температуры в резонаторе РГС. Данный эффект можно объяснить следующим образом. При повышении

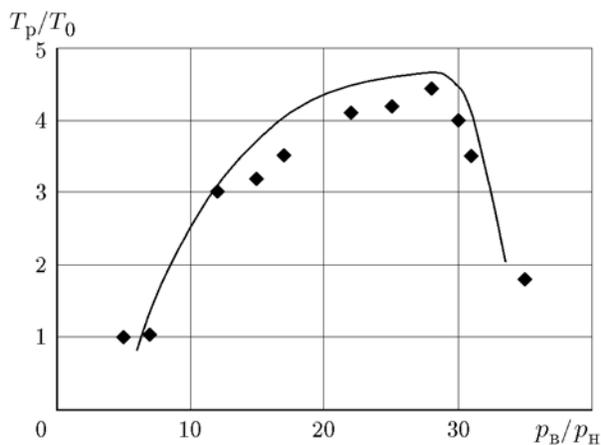


Рис. 5. Зависимость относительной средней температуры газа в застойной зоне резонансной полости от относительного перепада давления в сопле РГС:

сплошная линия — расчет, точки — эксперимент

p_v/p_n растет интенсивность ударно-волновой структуры и, соответственно, увеличивается нагрев газа в резонансной полости. При этом расстояние от среза сопла до прямого скачка уплотнения увеличивается и он смещается в сторону входной кромки резонатора. При достижении значения $p_v/p_n \approx 28$ прямой скачок проникает внутрь резонансной полости и пульсации практически прекращаются. Течение переходит в квазистационарный режим, при котором нагрев газа отсутствует. Максимальная средняя температура газа в застойной зоне резонансной полости при этом достигает значений выше $4.5T_0$, что превышает точку воспламенения топливной пары этанол + воздух.

Проведенные расчеты и эксперименты показали, что после подачи этанола в РГС формируется двухфазный поток. В потоке происходит дробление капель и образуется полидисперсная аэрозоль. После этого часть капель из потока попадает в резонансную полость, а часть — в атмосферу. Ввиду высокой температуры газа, капли в застойной зоне резонансной полости начинают испаряться. В зависимости от режимов работы РГС характер изменения температуры внешней поверхности резонатора может различаться. Типичные примеры измерения относительной температуры резонатора представлены на рис. 6. В случае воспламенения воздушно-этаноловой смеси относительная температура T_p/T_0 растет за счет тепловыделения при горении. Если топливная смесь не воспламеняется, температура в резонаторе

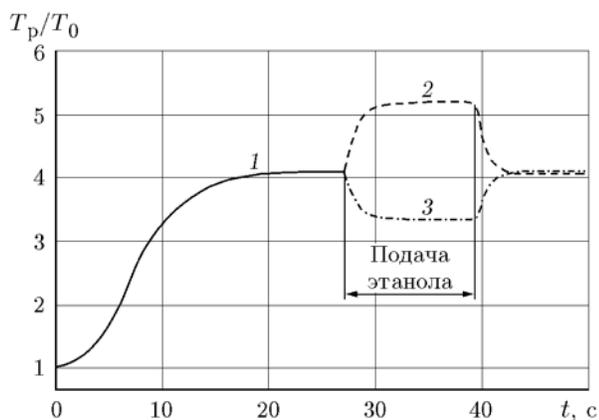


Рис. 6. Пример измерения относительной температуры резонатора:

1 — до подачи этанола, 2 — после подачи этанола с последующим его воспламенением, 3 — после подачи этанола без воспламенения

снижается. Это является следствием расходования части тепловой энергии, выделяемой в результате газодинамического нагрева газа, на испарение этанола.

Анализ спектральных характеристик пульсаций давления показывает, что при воспламенении топливной смеси (рис. 7, а, интервал времени 12 ÷ 22 с) происходит увеличение частоты f первой и последующих мод колебаний газа на 5 ÷ 7 %, что обусловлено повышением температуры газа в резонансной полости. При этом несколько увеличивается (до 10 %) амплитуда пульсаций. Вследствие интенсификации турбулентных пульсаций при горении проявляется низкочастотная составляющая спектральной характеристики. В случае отсутствия воспламенения топливной смеси (рис. 7, б, интервал времени

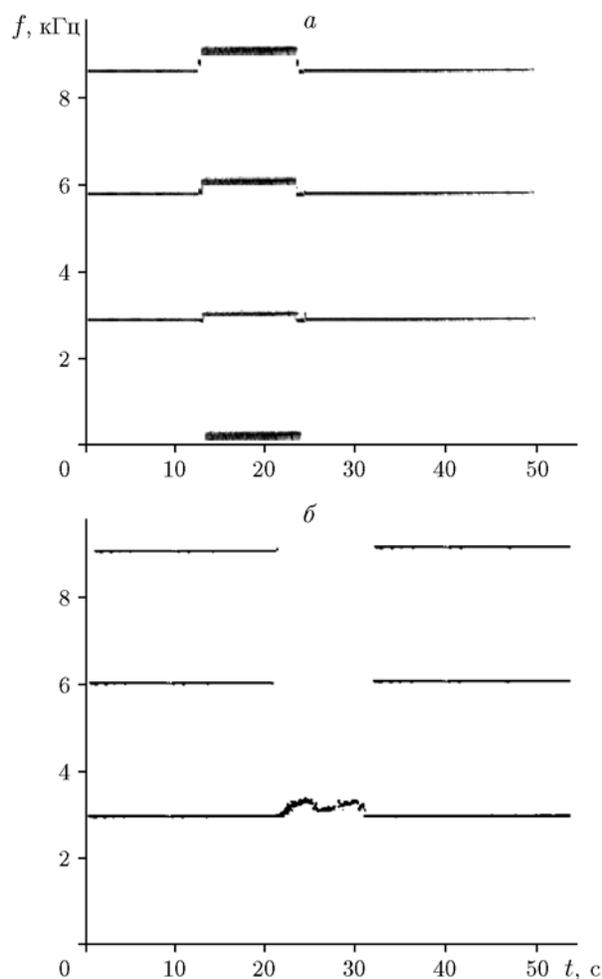


Рис. 7. Результаты измерения частоты пульсаций давления в случае воспламенения (а) и невоспламенения (б) топливной смеси

20 ÷ 30 с) амплитуда пульсаций давления существенно снижается. При этом амплитуда первой моды колебаний уменьшается более чем в четыре раза, а более высокие моды практически пропадают. Это свидетельствует о значительной роли конденсированной фазы при формировании структуры потока и о существенном влиянии испарения жидкости на интенсивность ударных волн в резонансной полости для исследуемых режимов. Частота f первой моды колебаний увеличивается. Это может быть следствием заполнения резонансной полости парами этанола, которые имеют более высокую скорость звука относительно воздуха (при реализуемых в резонансной полости параметрах). Существенное изменение f по времени указывает на нестабильность процессов тепло- и массообмена в резонансной полости.

На основе анализа экспериментальных данных выявлены режимные условия воспламенения воздушно-этаноловой смеси в РГС (рис. 8). Показано, что воспламенение этой смеси возможно при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0.8 \div 3.1$. При $\alpha < 0.8$ в резонансную полость РГС попадает большое количество этанола, вследствие чего практически вся тепловая энергия расходуется на испарение этанола и температура в резонансной полости не достигает необходимого для воспламенения уровня. При $\alpha > 3.1$ концентрация этанола в резонаторе становится ниже предела воспламенения. Воспламенение этанола с воздухом также зависит от p_v/p_n . Показано, что наиболее стабильное воспламенение реализуется в диапазоне $p_v/p_n = 8 \div 28$. На рис. 8 штриховой линией выделена область наиболее благоприятных условий для воспламенения топливной смеси.

Расчеты и эксперименты показали, что в большинстве случаев воспламенение топливной смеси инициируется в застойной зоне резонатора вблизи торцевой поверхности и распространяется вдоль резонатора к соплу РГС. Однако в случае подачи обедненной горючим топливной смеси ($\alpha > 1.5$) возможна реализация воспламенения этанола с воздухом в конфузорной части резонатора (рис. 9).

Для исследованных режимов установлено (расчетными методами), что период индукции смеси воздух + этанол в РГС составляет 18 ÷ 80 мс (с момента подачи этанола). При этом (рис. 10) с увеличением коэффициента из-

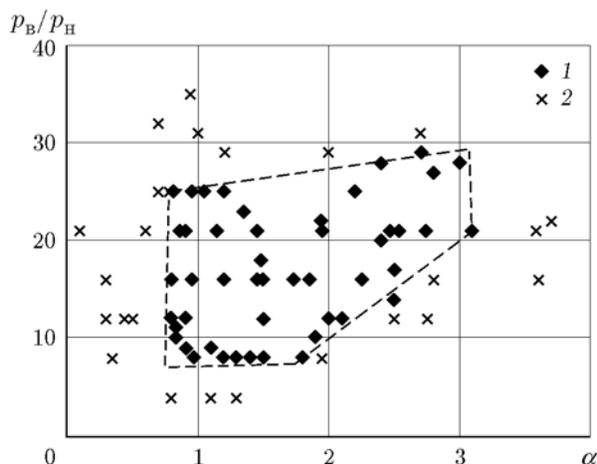


Рис. 8. Режимные характеристики РГС:

1 — режимы с воспламенением, 2 — режимы без воспламенения

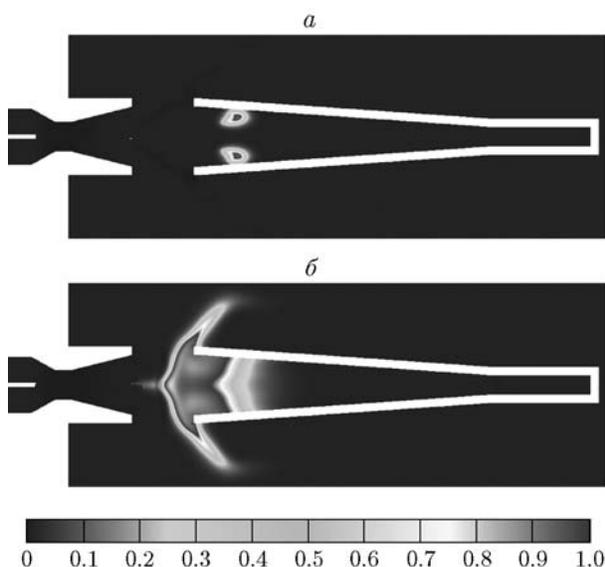


Рис. 9. Массовая концентрация продуктов сгорания этанола с воздухом в проточном тракте РГС в различные моменты времени:

a — $\Delta t = 25$ мс, b — $\Delta t = 28$ мс

бытка воздуха время задержки воспламенения растет. Повышение относительного давления в диапазоне $p_v/p_n = 8 \div 28$ обеспечивает снижение периода задержки воспламенения вследствие повышения тепловыделения в резонансной полости, более интенсивного дробления и испарения этанола, а также ускорения химических реакций.

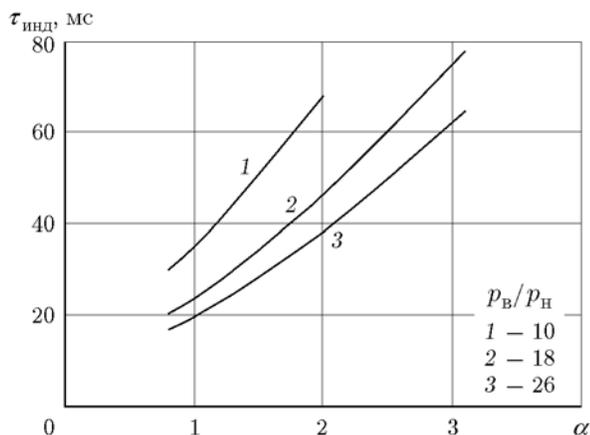


Рис. 10. Зависимость периода задержки воспламенения от коэффициента избытка воздуха

ВЫВОДЫ

На базе полученных в работе результатов могут быть сделаны следующие выводы.

1. Показано, что температура в резонаторе РГС выбранной конфигурации ($S/D_1 = 13$, $L/D_1 = 2$, $D_2/D_1 = 2$, $D_3/D_1 = 2$, $D_4/D_1 = 0.7$) увеличивается с повышением относительного перепада давления при $p_в/p_н < 28$. Дальнейший рост относительного перепада приводит к резкому снижению температуры в резонаторе РГС. Максимальная средняя температура газа в застойной зоне резонансной полости при этом достигает значений выше $4.5T_0$, что превышает точку воспламенения топливной пары этанол + воздух. Различие расчетных и экспериментальных данных по относительной температуре нагрева резонатора составляет не более 12 % и обусловлено неучтенными потерями теплоты.

2. Воспламенение этанола с воздухом реализуется при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0.8 \div 3.1$. При $\alpha < 0.8$ в резонансную полость РГС попадает большое количество этанола, вследствие чего практически вся тепловая энергия расходуется на испарение этанола и температура в резонансной полости не достигает необходимого для воспламенения уровня. Увеличение α свыше значения 3.1 приводит к снижению концентрации этанола в резонаторе ниже предела воспламенения. Наиболее стабильное воспламенение имеет место при $p_в/p_н = 8 \div 28$.

3. Рассчитанный (с помощью разработанной и апробированной на экспериментальных

данных других авторов математической модели) период задержки воспламенения смеси воздух + этанол в РГС составляет $18 \div 80$ мс. При этом с увеличением коэффициента избытка воздуха период задержки растет. Повышение относительного давления в диапазоне $p_в/p_н = 8 \div 28$ обеспечивает снижение периода задержки воспламенения.

4. При рассматриваемых условиях в резонансной полости до начала подачи этанола возникает автоколебательный режим течения с пульсациями давления высокой интенсивности, сопровождаемый нагревом газа. Частота пульсаций в РГС близка к частоте автоколебаний в полузамкнутой трубе. После подачи этанола и воспламенения топливной смеси происходит увеличение частоты f первой и последующих мод колебаний газа на $5 \div 7$ % и повышение амплитуды до 10 %. В случае отсутствия воспламенения топливной смеси амплитуда пульсаций давления снижается более чем в четыре раза и повышается частота колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронежский А. В., Полянский А. Р., Арефьев К. Ю. Численный анализ неконсервативных акустических систем применительно к устройствам инициации рабочего процесса в генераторах высокоэнтальпийных потоков // Наука и образование: электронное научное издание. — <http://www.technomag.edu.ru/doc/339499.html>. — 77-30569/339499. — Проверено 29.01.2016.
2. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели / под ред. Д. А. Ягодникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.
3. Методы измерения и обработки параметров физических процессов при испытаниях авиационных двигателей и энергетических установок / В. А. Скибин, Ю. И. Павлов, В. Г. Попов и др.; под ред. В. А. Скибина. — М.: Изд-во МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2007.
4. Sprenger H. S. Über Thermische Effekte bei Resonanzstörung // Mitteilungen aus dem Institut für Aerodynamik. — 1954. — Bd 6. — S. 18–35.
5. Thompson P. A. Resonance Tubes: PhD Thesis / Inst. of Technology. — Massachusetts, USA, 1960.
6. Купцов В. М., Семенов В. В. Газодинамический нагреватель с диффузором // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1989. — № 4. — С. 44–47.
7. Арефьев К. Ю., Воронежский А. В., Ильченко М. А. Исследование динамических характеристик резонансной газодинамической си-

- стемы воспламенения топливной смеси // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 41–46.
8. Антонов А. Н., Купцов В. М., Комаров В. В. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях. — М.: Машиностроение, 1990.
 9. Воронецкий А. В., Арефьев К. Ю., Захаров В. С. Расчетно-теоретическое исследование резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД малой тяги // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2012. — № 1. — С. 31–41.
 10. Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Сучков С. А. Расчетное исследование особенностей дробления и испарения капель в газодинамических течениях с циклическими ударными волнами // Изв. вузов. Машиностроение. — 2015. — № 10. — С. 17–30.
 11. Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В. Моделирование процесса дробления и испарения капель нереагирующей жидкости в высокоэнтальпийных газодинамических потоках // Теплофизика и аэромеханика. — 2015. — № 5. — С. 609–620.
 12. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. О динамике дробления капель в ударных волнах // ПМТФ. — 1987. — № 2. — С. 108–115.
 13. Бойко В. М., Поплавский С. В. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 4. — С. 76–82.
 14. Abramzo B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 1989. — V. 32. — P. 1605–1618.
 15. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. — М.: Наука, 1980.
 16. Яхимовский К. Дж. Упрощенный механизм горения углеводородного топлива // Аэрокосм. техника. — 1986. — № 6. — С. 148–156.
 17. Marinov N. A Detailed Chemical Kinetic Model for Ethanol Oxidation. — April W15, 1997. — (Preprint Western States Section/Co Institute Spring Meeting Livermore, CA).
 18. Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И. Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 29–36.
 19. Карпов В. П., Политенкова Г. Г., Северин Е. С. Турбулентное горение спиртов // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 12–14.
 20. Black G., Curran H. J., Pichon S., Simmie J. M., Zhukov V. Bio-butanol: Combustion properties and detailed chemical kinetic model // Combust. Flame. — 2010. — V. 157. — P. 363–373.
 21. Moser V. R., Williams A., Haas M. J., McCormick R. L. Exhaust emissions and fuel properties of partially hydrogenated soybean oil methyl esters blended with ultra low sulfur diesel fuel // Fuel Process. Technol. — 2009. — V. 90. — P. 1122–1128.
 22. Воронецкий А. В., Макаров Д. В., Скибин А. П., Филимонов Л. А., Югов В. П. Расчет процессов горения и охлаждения в малогабаритной камере сгорания // Мат. моделирование. — 1999. — Т. 11, № 4. — С. 29–36.
 23. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. — М.: Металлургия, 1994.
 24. Трусов Б. Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия», 24–26 августа 2005, Алма-Ата, Казахстан. — 2005. — С. 52–57.
 25. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. — М.: Мир, 1986.
 26. Дулов В. Г., Максимов В. П. Термоакустика полужамкнутых объемов. — Новосибирск, 1986. — (Препринт / АН отд-ние. ИТПМ; № 2886).
 27. Устинов В. М. Экспериментальное исследование колебаний давления в резонансной трубе // Прикладные задачи гидрогазодинамики: межвуз. сб. науч. тр. — М., 1986. — С. 52–60.
 28. Глазнев В. Н., Коробейников Ю. Г. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний // ПМТФ. — 2001. — Т. 42, № 4. — С. 62–67.

Поступила в редакцию 9/VIII 2016 г.,
в окончательном варианте — 29/XI 2016 г.