

УДК 536.46

МЕХАНИЗМ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В КАНАЛЕ ЗАРЯДА ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПРЯМОТОЧНОМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

© 2020 г. С. А. Рашковский^{1,*}, академик РАН Ю. М. Милёхин², А. В. Федорычев², С. Е. Якуш¹

Поступило 06.08.2019 г.

После доработки 06.08.2019 г.

Принято к публикации 06.08.2019 г.

Впервые проведен анализ механизма стабилизации горения в канале заряда твердого топлива в ПВРДТТ со стабилизатором горения, роль которого играет уступ в передней части канала заряда или автономный газогенератор, работающий на твердом топливе, способном к самостоятельному горению. Разработана математическая модель, позволяющая оценивать устойчивость процесса горения в канале заряда ПВРДТТ. Показано, что существует несколько параметров, характеризующих заряд твердого топлива и ПВРДТТ в целом, которые влияют на устойчивость работы ПВРДТТ. Основными контролируемыми параметрами являются температура продуктов сгорания в стабилизаторе горения и расход продуктов сгорания из стабилизатора горения (которыми можно управлять, изменяя размеры и форму стабилизатора горения), а также степень турбулентности потока воздуха в канале заряда. Проведен анализ устойчивости процесса горения в канале заряда ПВРДТТ и выявлены возможные режимы работы ПВРДТТ при изменении управляющих параметров.

Ключевые слова: ПВРД на твердом топливе, заряд твердого топлива, стабилизатор горения, устойчивость горения, критические условия, механизм стабилизации горения

DOI: 10.31857/S2686953520010136

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире активно разрабатываются прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердом топливе (ПВРДТТ) для беспилотных летательных аппаратов. Условная схема ПВРДТТ для гиперзвуковых условий полета приведена на рис. 1.

Как показывают эксперименты [1, 2], при определенных условиях (размеры и форма заряда твердого топлива (ТТ), тип ТТ, полетные условия и др.) горение ТТ в ПВРДТТ может быть неустойчивым. Для обеспечения устойчивого горения ТТ в камере сгорания (КС) ПВРДТТ используют стабилизатор горения [1, 2], роль которого играет уступ на входе в камеру сгорания или расширение в передней части канала заряда (рис. 1).

Экспериментальные исследования [1, 2] показали, что параметры стабилизатора горения су-

щественно влияют на устойчивость горения ТТ и на стабильность работы ПВРДТТ в целом.

Численное моделирование нестационарных процессов в КС ПВРДТТ со стабилизатором горения [3–5] выявило особенности возникновения неустойчивости горения ТТ. Установлено, что при перемещении в область неустойчивости сначала устойчивость теряет горение ТТ в канальной части заряда, в то время как горение ТТ в стабилизаторе остается устойчивым. И только дальнейшее ухудшение условий горения может привести к неустойчивости горения в стабилизаторе и полному погасанию.

Существующие математические модели позволяют рассчитать стационарные [6–8] и нестационарные [3–5] процессы в КС ПВРДТТ. Вместе с тем вычислительная трудоемкость таких расчетов в настоящее время не позволяет проводить параметрические исследования в широком диапазоне параметров, требуемые на этапе выбора конструкции заряда ТТ, стабилизатора горения и ПВРДТТ в целом.

Впервые проанализирован механизм стабилизации горения в канале заряда ТТ в ПВРДТТ и разработана модель, позволяющая оценивать устойчивость процесса горения.

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральный центр двойных технологий “Союз”, Дзержинский, Московская обл., Россия

*E-mail: rash@ipmnet.ru

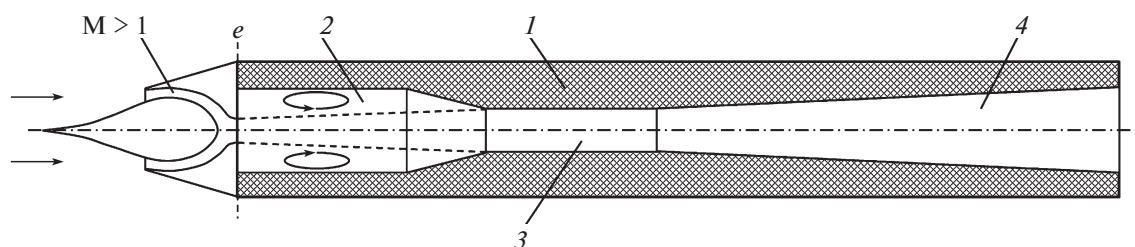


Рис. 1. Схема ГПВРДТТ со стабилизатором горения: 1 — заряд твердого топлива, 2 — секция стабилизатора горения, 3 — цилиндрическая секция, 4 — расширяющийся конус. Штриховые линии указывают границу застойной зоны. В застойной зоне показана циркуляция газа.

МЕХАНИЗМ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В КАНАЛЕ ЗАРЯДА

Горение ТТ в ПВРДТТ является вынужденным, так как ТТ не содержит (или содержит в недостаточном количестве) окислительные компоненты, необходимые для поддержания самостоятельного горения. Как результат выделение тепла возможно только в ходе реакций газообразных продуктов разложения ТТ с воздухом, поступающим в КС через воздухозаборник. Горение ТТ в ПВРДТТ происходит в две стадии [3–5]: а) газификация ТТ под действием конвективного и радиационного теплового потока, поступающего к поверхности заряда из газовой смеси в КС (в результате в газовый поток поступают продукты разложения ТТ, которые смешиваются с воздухом, образуя горючую смесь), и б) экзотермические химические реакции в смеси воздуха с продуктами газификации ТТ. С достаточной точностью можно считать, что скорость газификации ТТ G_b зависит от разности температур газового потока у поверхности заряда T и поверхности заряда T_s : $G_b = B(T - T_s)$, где B — параметр, зависящий от скорости в ядре потока и параметров газовой смеси [3–5]. В свою очередь, температура газового потока у поверхности заряда зависит от содержания в нем кислорода и продуктов газификации ТТ. Содержание продуктов газификации ТТ в потоке определяется скоростью газификации ТТ.

При уменьшении температуры ядра потока (при прочих равных условиях) уменьшается тепловой поток из газовой фазы к поверхности горения, что, в свою очередь, ведет к уменьшению скорости газификации ТТ и снижению содержания продуктов разложения ТТ в газовом потоке. Следствием этого является дальнейшее понижение температуры потока. При неблагоприятных условиях это может привести к лавинообразному снижению температуры потока и скорости газификации ТТ и закончиться его погасанием.

Во избежание возникновения такой неустойчивости температура в потоке должна поддерживаться на некотором достаточно высоком уровне

и, кроме того, должна слабо зависеть от локальной скорости газификации ТТ. Это можно обеспечить с помощью стабилизатора горения, представляющего собой рециркуляционную зону, в которой время пребывания продуктов разложения ТТ достаточно для завершения газофазных экзотермических реакций. В результате температура газовой смеси внутри стабилизатора горения может поддерживаться на высоком уровне независимо от горения ТТ в канале заряда. Высокотемпературные продукты сгорания ТТ поступают из стабилизатора горения в канал заряда, образуя высокотемпературный газовый слой у поверхности заряда и тем самым обеспечивая поступление к поверхности заряда необходимого количества тепла для газификации ТТ. Можно сказать, что стабилизатор горения играет роль автономного газогенератора. Отметим, что для стабилизации горения в канале заряда можно использовать и реальный автономный газогенератор, работающий на твердом топливе, способном к самостоятельному горению [8].

В результате проведенного качественного анализа приходим к выводу, что существует некий диапазон параметров ПВРДТТ (в том числе размеры и форма стабилизатора горения), в котором горение твердого топлива происходит устойчиво.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В КАНАЛЕ ЗАРЯДА

Стабилизатор горения можно рассматривать как автономный газогенератор, из которого в канал заряда ТТ поступает газовая смесь, имеющая температуру T_{fn} , массовую долю непрореагировавшего горючего m_f^{fn} и массовую долю непрореагировавшего кислорода m_{ox}^{fn} . Параметры продуктов сгорания на выходе из стабилизатора горения (в том числе и расход газовой смеси из стабилизатора G_{fn}) считаются заданными характеристиками стабилизатора. Газовая смесь, вытекающая из стабилизатора горения, создает у поверхности канала заряда высокотемпературный слой, который, с одной стороны, граничит со стенкой кана-

ла, а с другой, — с более холодным ядром потока, состоящим главным образом из воздуха.

Рассмотрим порцию газовой смеси — лагранжу частицу (ЛЧ), поступившую из стабилизатора горения в канал заряда и движущуюся вдоль поверхности заряда. Рассматриваемая ЛЧ будет обмениваться теплом и веществом с поверхностью заряда ТТ и с ядром потока воздуха в канале заряда. От поверхности заряда ТТ в рассматриваемую ЛЧ будут поступать горючие компоненты (продукты разложения ТТ), а к поверхности заряда из нее будет поступать тепло, которое, с одной стороны, будет вызывать газификацию твердого топлива, а с другой стороны, будет приводить к потере тепла в самой ЛЧ. Теплообмен между ЛЧ и ядром потока будет приводить к поступлению кислорода в ЛЧ из ядра потока и к расходу горючих компонентов из ЛЧ в ядро потока, а также к потере тепла ЛЧ за счет теплообмена с ядром потока.

Будем считать, что ЛЧ имеет постоянную массу M . В системе отсчета, движущейся вместе с ЛЧ, все ее параметры будут зависеть от времени. Движение ЛЧ в камере сгорания ПВРДТТ можно считать изобарным [3–8].

Предполагая, что между горючим (продуктами газификации ТТ) и кислородом протекает реакция первого порядка, запишем уравнения баланса массы и энергии для рассматриваемой ЛЧ:

$$M \frac{dm_f}{dt} = G_b - G_t m_f - Mw, \quad (1)$$

$$M \frac{dm_{ox}}{dt} = G_t (m_{ox}^c - m_{ox}) - Mw, \quad (2)$$

$$Mc_p \frac{dT}{dt} = G_t c_p (T_c - T) - \alpha(T - T_s) + QMw, \quad (3)$$

где m_f и m_{ox} — массовые доли горючего и кислорода в ЛЧ, T — температура ЛЧ, T_s — температура поверхности горения ТТ, $G_b = B(T - T_s)$ — скорость газификации ТТ, $w = Am_f m_{ox} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ — скорость газовой химической реакции между горючим и окислителем, A и E — предэкспонент и энергия активации химической реакции, G_t — массовая скорость турбулентной диффузии между ЛЧ и ядром потока в канале заряда, α — коэффициент теплообмена между ЛЧ и поверхностью заряда ТТ, c_p — удельная теплоемкость газа в ЛЧ при постоянном давлении, m_{ox}^c — массовая доля кислорода в ядре потока, T_c — температура ядра потока, Q — тепловой эффект химической реакции.

Первое слагаемое в правой части (1) описывает поступление горючих компонентов в ЛЧ с поверхности заряда ТТ за счет его газификации. Второе слагаемое — турбулентную диффузию го-

рючих компонентов из ЛЧ в ядро потока (считается, что в ядре потока горючие компоненты отсутствуют, так как перерабатываются в химической реакции до того, как попадут в ядро потока). Третье слагаемое описывает расход горючих компонентов в ЛЧ за счет протекания химической реакции. Первое слагаемое в правой части (2) описывает турбулентный перенос кислорода между ЛЧ и ядром потока, второе слагаемое описывает расход кислорода в ЛЧ за счет протекания химической реакции. Первое слагаемое в правой части (3) описывает турбулентный теплообмен между ЛЧ и ядром потока, второе слагаемое описывает тепловые потери ЛЧ за счет теплообмена со стенкой (поверхностью заряда ТТ), третье слагаемое описывает тепловыделение в ЛЧ за счет протекания химической реакции.

Начальными условиями для ЛЧ являются параметры газовой смеси на выходе из стабилизатора горения: $T(0) = T_{fh}$; $m_{ox}(0) = m_{ox}^{fh}$; $m_f(0) = m_f^{fh}$.

Введем безразмерные параметры

$$\tau = \frac{G_t}{M} t; \quad x = \frac{G_t}{BT_c} m_f; \quad y = \frac{m_{ox}}{m_{ox}^c}; \quad (4)$$

$$\theta = \frac{T}{T_c}; \quad \theta_s = \frac{T_s}{T_c}; \quad \varepsilon = \frac{E}{RT_c};$$

$$a = \frac{MA}{G_t} m_{ox}^c; \quad b = \frac{MA}{G_t^2} BT_c; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{MAQ}{G_t^2 c_p} BT_c m_{ox}^c; \quad \gamma = \frac{\alpha}{c_p G_t}.$$

Тогда уравнения (1)–(3) записываются в безразмерном виде

$$\frac{dx}{d\tau} = \theta - \theta_s - x - axy \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta}\right), \quad (6)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y - bxy \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta}\right), \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = 1 - \theta - \gamma(\theta - \theta_s) + \beta xy \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\theta}\right). \quad (8)$$

Уравнения (6)–(8) решаются при начальных условиях (при $\tau = 0$):

$$\theta = \theta_{fh} \equiv \frac{T_{fh}}{T_c}; \quad x = x_{fh} \equiv \frac{G_t}{BT_c} m_f^{fh}; \quad (9)$$

$$y = y_{fh} \equiv \frac{G_t}{BT_c} m_{ox}^{fh}.$$

В общем случае система уравнений (6)–(8) с начальными условиями (9) может быть решена численно.

Для определения условий устойчивого горения ТТ в канале заряда достаточно исследовать стационарное решение уравнений (6), (7) на устойчивость. Эта задача аналогична классиче-

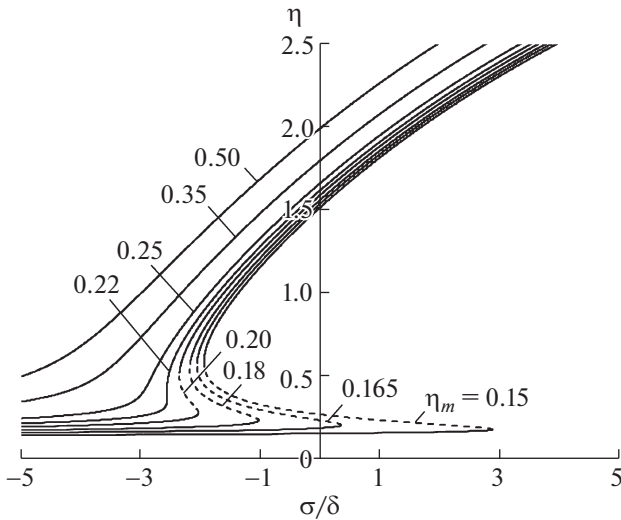


Рис. 2. Решение уравнения (10) в виде зависимостей η от σ/δ для $\delta = \omega = 0.2$ и разных значений параметра η_m .

где $\sigma = b\varepsilon(\eta_m - \eta_s + 1/\delta) - a$; $\eta = \theta/\varepsilon$; $\eta_s = \theta_s/\varepsilon$; $\eta_m = \frac{(1 + \gamma\theta_s)}{(1 + \gamma)\varepsilon}$; $\omega = b\varepsilon - a\delta$; $\delta = b\varepsilon(1 + \gamma)/\beta$ – безразмерные параметры.

Решения уравнения (10) в виде зависимости η от σ/δ для $\delta = \omega = 0.2$ и разных значений параметра η_m приведены на рис. 2. Видно, что в зависимости от значения параметра η_m функция $\eta(\sigma/\delta)$ может быть монотонно возрастающей или немонотонной. Легко показать из анализа уравнения (8), что в случае монотонно возрастающего решения стационарное состояние является устойчивым. Более детального анализа требует случай немонотонного решения $\eta(\sigma/\delta)$, общий вид которого показан на рис. 3а. Стрелки на этом рисунке указывают направление изменения температуры.

Как следует из рис. 3а, в случае немонотонной зависимости $\eta(\sigma/\delta)$ весь диапазон изменения параметра σ/δ можно разбить на три области (на рисунке эти области отделены друг от друга вертикальными штриховыми линиями).

Область 1: $\sigma/\delta < (\sigma/\delta)_{\min}$, область абсолютной неустойчивости. В этой области уравнение (10) имеет единственное решение для каждого значения σ/δ . Это решение является устойчивым и соответствует низкотемпературному режиму, в котором температура рассматриваемой ЛЧ существенно ниже равновесной термодинамической температуры при полном сгорании горючих компонентов. Этот режим соответствует прекращению активного горения ТТ, а значит, и прекращению работы двигателя. Отметим, что на этом режиме возможна газификация ТТ, если статическая температура потока воздуха больше температуры начала газификации ТТ. Однако скорость газифи-

ской задаче об устойчивости процесса в реакторе идеального перемешивания [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя простые преобразования уравнений (6)–(8), легко показать, что стационарная безразмерная температура θ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\sigma}{\delta} = \frac{(\eta - \eta_m)}{1 - \delta(\eta - \eta_m)} \exp\left(\frac{1}{\eta}\right) - \frac{\omega}{\delta^2} [1 - \delta(\eta - \eta_m)], \quad (10)$$

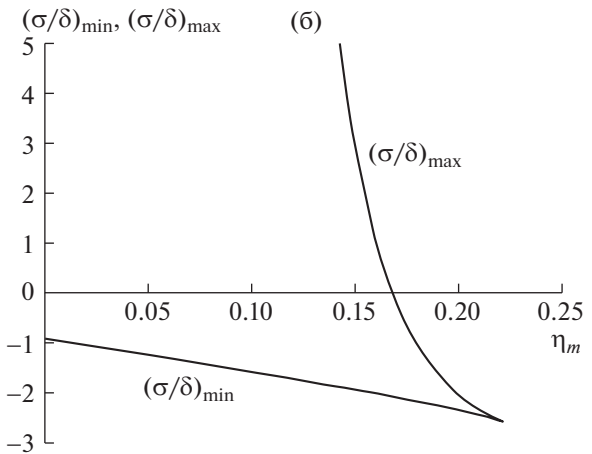
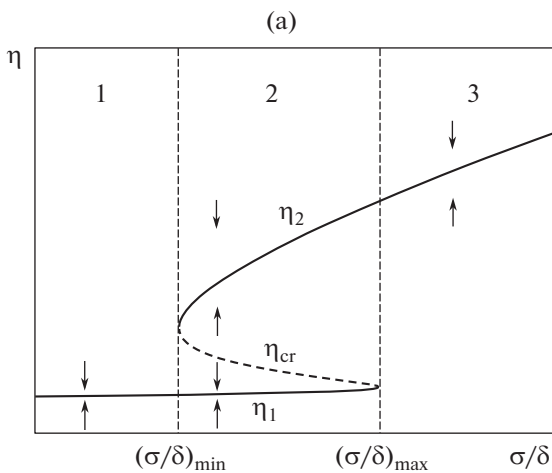


Рис. 3. Характерные режимы работы ПВДТТ: а – области устойчивого и неустойчивого горения на плоскости $(\eta, \sigma/\delta)$ и б – зависимости $(\sigma/\delta)_{\min}$ и $(\sigma/\delta)_{\max}$ от параметра η_m для $\delta = \omega = 0.2$. 1 – область абсолютной неустойчивости горения ТТ в канале заряда, 2 – область условной устойчивости горения; 3 – область абсолютной устойчивого горения. Стрелками указаны направления изменения температуры в соответствующих областях.

кации и, соответственно, скорость экзотермических химических реакций в газовой фазе будут настолько малы, что температура газовой смеси в камере сгорания будет мало отличаться от температуры поступающего воздуха. Это означает, что в этом режиме даже если удастся запустить двигатель (например, с помощью автономного воспламенительного устройства), он самопроизвольно прекратит работу.

Область 2: $(\sigma/\delta)_{\min} < \sigma/\delta < (\sigma/\delta)_{\max}$, область условной устойчивости. В этой области для каждого значения параметра σ/δ уравнение (10) имеет три решения: η_1 , η_{cr} и η_2 , где $\eta_1 < \eta_{cr} < \eta_2$. Режимы работы ПВРДТТ, соответствующие решениям η_1 и η_2 , являются устойчивыми. Первый из них (η_1) является низкотемпературным режимом, он соответствует самопроизвольному погасанию ТТ в канале заряда и прекращению работы двигателя. Второй режим (η_2) является высокотемпературным, он соответствует устойчивой работе ПВРДТТ. Режим $\eta = \eta_{cr}$ (показан на рис. 3а штриховой линией) является неустойчивым: теоретически он возможен, но любые сколь угодно малые возмущения, которые существуют в реальном процессе, приведут к тому, что двигатель самопроизвольно перейдет на один из устойчивых режимов – либо высокотемпературный, либо низкотемпературный. Неустойчивое решение $\eta = \eta_{cr}$ играет важную роль в процессе запуска двигателя. Если в начальный момент времени температура газа, вытекающего из стабилизатора горения, θ_{fh} была выше значения $\varepsilon\eta_{cr}$, то температура в КС ПВРДТТ начнет повышаться и выйдет на устойчивый высокотемпературный уровень $\theta_2 = \varepsilon\eta_2$, дальнейшая работа двигателя будет происходить устойчиво. Если же в начальный момент времени температура газа, вытекающего из стабилизатора горения, θ_{fh} будет ниже значения $\varepsilon\eta_{cr}$, то температура в КС ПВРДТТ начнет понижаться и выйдет на устойчивый низкотемпературный уровень $\theta_1 = \varepsilon\eta_1$; в этом случае произойдет самопроизвольное погасание ТТ и работа двигателя прекратится.

Область 3: $\sigma/\delta > (\sigma/\delta)_{\max}$, область абсолютной устойчивости. В этой области уравнение (10) имеет единственное решение для каждого значения σ/δ . Это решение соответствует высокотемпературному режиму, при котором температура рассматриваемой ЛЧ существенно выше статической температуры в ядре потока воздуха. Этот режим соответствует интенсивному горению ТТ и является, безусловно, устойчивым: двигатель выходит на стационарный режим работы при любой температуре на выходе из стабилизатора горения θ_{fh} , при этом никакие изменения параметра σ/δ не способны нарушить устойчивую работу двигателя.

Найдем значения параметров $(\sigma/\delta)_{\min}$ и $(\sigma/\delta)_{\max}$.

В этих точках $\frac{d(\sigma/\delta)}{d\eta} = 0$. Дифференцируя правую часть (10) по η и приравнявая производную нулю, получим уравнение

$$z^2 \left[1 + \omega\eta^2 \exp\left(-\frac{1}{\eta}\right) \right] - z + \delta\eta^2 = 0, \quad (11)$$

где

$$z = 1 - \delta(\eta - \eta_m). \quad (12)$$

Решениями уравнений (11), (12) являются зависимости $(\sigma/\delta)_{\min}$ и $(\sigma/\delta)_{\max}$ от параметра η_m . Соответствующие характерные зависимости приведены на рис. 3б.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа механизма стабилизации горения в канале заряда ТТ в ПВРДТТ разработана модель, позволяющая оценивать устойчивость процесса горения. Из проведенного анализа следует, что имеется несколько переменных параметров, которые будут определять устойчивость или неустойчивость работы ПВРДТТ. Основными контролируруемыми параметрами являются T_{fh} , G_{fh} (которыми можно управлять, изменяя размеры и форму стабилизатора горения) и G_t (которым можно управлять, изменяя степень турбулентности потока воздуха за счет изменения размеров и формы стабилизатора горения). Из проведенного анализа следует, что для обеспечения устойчивой работы ПВРДТТ необходимо стремиться к увеличению параметра σ/δ . Из соотношений (4), (5) следует, что при прочих равных условиях параметр σ/δ пропорционален массе ЛЧ, которая по определению пропорциональна расходу продуктов сгорания из стабилизатора горения $M \sim G_{fh}$.

Таким образом, любые изменения в конструкции стабилизатора горения, которые приводят к росту расхода G_{fh} , будут способствовать стабилизации процесса в ПВРДТТ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690135-5. Работа частично финансировалась за счет средств гранта РФФИ № 16-29-01084.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zvuloni R., Gany A., Levy Y. // J. Propulsion. 1989. V. 5. P. 32–37.
2. Ben-Yakar A., Natan B., Gany A. // J. Propulsion and Power. 1998. V. 14. P. 447–455.

3. *Rashkovskiy S.A., Yakush S.E., Baranov A.A.* // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 815. № 1. P. 012008.
4. *Рашковский С.А., Якуш С.Е., Баранов А.А.* // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 2. С. 83–88.
5. *Rashkovskiy S.A., Yakush S.E., Baranov A.A.* // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1009. № 1. P. 012032.
6. *Wang L., Wu Z., Chi H., Liu C., Tao H., Wang Q.* // J. Propulsion and Power. 2014. V. 31. P. 685–693.
7. *Chi H., Wei Z., Wang L., Li B., Wu Z.* // J. Propulsion and Power. 2015. V. 31. P. 1019–1032.
8. *Hu M., Wei Z., Ding S., Wang N.* // Acta Astronautica. 2018. V. 148. P. 210–219.
9. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.* Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.

MECHANISM OF COMBUSTION STABILIZATION IN THE CHANNEL OF A SOLID FUEL GRAIN IN A RAMJET COMBUSTOR

S. A. Rashkovskiy^{a,#}, Academician of the RAS Yu. M. Milyokhin^b, A. V. Fedorychev^b, and S. E. Yakush^a

^a *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Federal Center of Dual Use Technologies Soyuz, Dzerzhinsky, Moscow region, Russian Federation*

[#]*E-mail: rash@ipmnet.ru*

An analysis of the stabilization mechanism of combustion in a solid fuel grain channel in a ramjet with a flame holder, the role of which plays a ledge in the front of the grain channel or an autonomous gas generator operating on solid fuel capable of self-combustion, is carried out for the first time. A mathematical model has been developed that allows evaluating the stability of the combustion process in the grain channel of ramjet. It is shown that there are several parameters characterizing the grain of solid fuel and ramjet as a whole, which affect the stability of the ramjet operation. The main controlled parameters are the temperature of the combustion products in the flame holder and the mass rate of combustion products from the flame holder (which can be controlled by changing the size and shape of the flame holder), as well as the degree of turbulence of the air flow in the grain channel. The analysis of the stability of the combustion process in the grain channel of the ramjet engine is carried out and possible modes of operation of the ramjet engine with changing control parameters are identified.

Keywords: Solid fuel ramjet engine, solid fuel grain, flame holder, combustion stability, critical conditions, combustion stabilization mechanism