

УДК 536.244

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ БОРСОДЕРЖАЩИХ ЭНЕРГОЕМКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СОСТАВОВ В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

К. Ю. Арефьев^{1,2}, А. В. Воронецкий², А. Н. Прохоров¹, Л. С. Яновский^{1,3}

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

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

³Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка

Дано описание экспериментальной установки и методики определения полноты сгорания газовой и конденсированной фаз продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнтальпийном дозвуковом воздушном потоке. Приведены результаты исследования процессов горения двухфазной топливной смеси в канале постоянного сечения при различных температурах, давлениях и соотношениях компонентов. Выявлены закономерности горения борсодержащей конденсированной фазы в высокоэнтальпийном воздушном потоке. Представленные данные могут быть полезны при проведении расчетных и экспериментальных исследований рабочих процессов в энергосиловых установках.

Ключевые слова: двухфазное течение, высокоэнтальпийный воздушный поток, горение, борсодержащая конденсированная фаза, полнота сгорания.

DOI 10.15372/FGV20170305

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития энергосиловых установок для аэрокосмической техники является применение борсодержащих энергоемких конденсированных составов (ЭКС) в качестве топлива для прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) [1–3]. Выбор бора и ряда химических соединений с ним в качестве основного высокоэнергетического компонента для ЭКС обусловлен высокими значениями объемной H_v^0 и массовой $H_u^0 = H_v^0/\rho_{\text{ЭКС}}$ ($\rho_{\text{ЭКС}}$ — плотность ЭКС) теплоты сгорания этих веществ [4] по сравнению с углеводородными горючими [5], а также с алюминий- и магнийсодержащими ЭКС [2]. В составах ЭКС борсодержащие компоненты могут применяться в виде аморфного и кристаллического бора, диборидов и полиборидов магния и алюминия, а также карборанов [4]. Массовое содержание бора в таких ЭКС составляет

10 ÷ 30 %, а суммарное содержание борсодержащих компонентов может превышать 60 %. Отметим, что объемная теплота сгорания перспективных борсодержащих ЭКС составляет $H_v^0 = 47 \div 56$ ГДж/м³, что на 20 ÷ 30 % выше, чем H_v^0 жидких углеводородных горючих.

Для организации надлежащего процесса сгорания современных ЭКС целесообразно использовать газогенераторную схему ПВРД [3, 4, 6], которая представлена на рис. 1. Принцип ее действия заключается в следующем [5, 7]. При высоких скоростях полета поток атмосферного воздуха 1 сжимается в воздухозаборном устройстве 2 и через изолятор 3 попадает в камеру дожигания 4. В газогенераторе (ГГ) 5 осуществляется первичное горение (газификация) ЭКС 6. Образовавшиеся газообразные и конденсированные продукты ЭКС через сопловые отверстия 7 ГГ попадают в камеру дожигания, где происходит их смешение с атмосферным воздухом и дожигание. Затем высокотемпературное рабочее тело поступает в сопло 8 и создает тягу. Таким образом, процесс горения ЭКС протекает в две стадии: первичное горение в ГГ за счет окислителя, на-

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-11-30012).

© Арефьев К. Ю., Воронецкий А. В., Прохоров А. Н., Яновский Л. С., 2017.

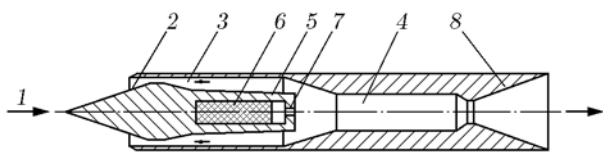


Рис. 1. Конфигурация ПВРД газогенераторной схемы:

1 — поток атмосферного воздуха, 2 — воздухозаборное устройство, 3 — изолятор, 4 — камера сгорания, 5 — ГГ, 6 — заряд ЭКС, 7 — сопловые отверстия газогенератора, 8 — сопло

ходящегося в составе самого ЭКС, и вторичное горение в камере дожигания образовавшихся продуктов (включая конденсированные частицы борсодержащих соединений) в воздушном потоке. Для определенности будем называть продукты первичного горения продуктами газификации ЭКС, понимая при этом, что они включают в себя и конденсированные частицы.

Следует отметить, что при температурах в камере дожигания менее 2500 К реализация высокой полноты сгорания борсодержащих частиц конденсированной фазы связана с большими трудностями [8], а при более высоких температурах значительными становятся потери энергии на диссоциацию продуктов сгорания [9]. Таким образом, организация эффективного сгорания двухфазных продуктов газификации ЭКС является важной научно-технической задачей и требует детального расчетно-экспериментального исследования.

Статья посвящена экспериментальному определению полноты сгорания газовой и конденсированной фаз продуктов газификации борсодержащих ЭКС в высокоэнтальпийном дозвуковом воздушном потоке в канале постоянного сечения при различных температурах, давлениях и соотношениях компонентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальное исследование процессов горения газовой и конденсированной фаз продуктов газификации борсодержащих ЭКС в высокоэнтальпийном дозвуковом воздушном потоке осуществлялось на стендах с присоединенным воздухопроводом [10]. Важным аспектом испытаний по этой схеме является моделирование параметров воздуха на входе в газодинамический тракт рабочего участка, в частно-

сти температуры торможения $T_{\text{вх}}^*$, полного давления $p_{\text{вх}}^*$ и скорости течения $u_{\text{вх}}$.

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, основными элементами которой являются генератор высокоэнтальпийного воздушного потока (ГВВП), газогенератор (ГГ) и рабочий участок (РУ), в котором имитировались условия работы ПВРД. РУ представляет собой цилиндрический канал постоянного сечения. Схема установки приведена на рис. 2. Для подогрева рабочего тела до температуры $T_{\text{вх}}^* = 450 \div 550$ К использовался ГВВП с электрическим подогревом воздуха, при $T_{\text{вх}}^* \approx 1500$ К — ГВВП с огневым подогревом и компенсацией кислородного баланса до содержания кислорода, соответствующего воздуху [11]. Получаемое на выходе ГВВП рабочее тело будем условно называть воздухом.

В конце РУ находилось сужающееся (звуковое) сопло 8, которое обеспечивало реализацию необходимой дозвуковой скорости течения высокоэнтальпийного воздушного потока в канале РУ.

РУ совместно с ГВВП устанавливался на динамометрической платформе 7, что позволяло измерять тягу, создаваемую во время работы установки. Для минимизации погрешностей при измерении тяги использовались устройства «безимпульсной» подачи 1 для подвода компонентов к ГВВП.

Заряд ЭКС 4 размещался в ГГ 5, где происходило его предварительное сгорание (газификация). Образовавшиеся продукты газификации ЭКС поступали в канал РУ, и там реализовывалось их дожигание с высокоэнтальпийным воздушным потоком.

В ходе экспериментов измерялись пара-

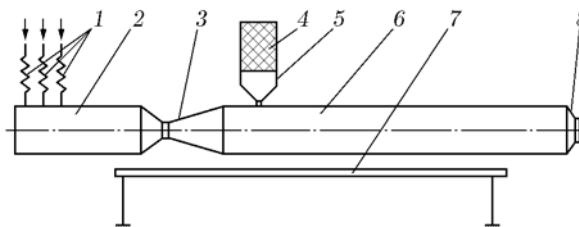


Рис. 2. Схема ЭУ:

1 — устройства «безимпульсной» подачи компонентов рабочего тела, 2 — ГВВП, 3 — стендовый переходник, 4 — заряд ЭКС, 5 — газогенератор, 6 — рабочий участок, 7 — динамометрическая платформа, 8 — сопло

метры, характеризующие как работу стендовых систем, так и эффективность сгорания ЭКС в ГГ и канале РУ. К их числу относятся: тяга, давление в ГГ, массовый расход компонентов рабочего тела, полное давление и температура высокоэнтальпийного воздушного потока, а также распределение статического давления по длине канала РУ.

Представленные в статье результаты получены с использованием каналов круглого сечения диаметром ≈ 100 мм и длиной до 2000 мм. Подача продуктов газификации ЭКС в РУ осуществлялась перпендикулярно оси канала. Исследования проведены при $T_{\text{вх}}^* = 450 \div 1500$ К. Для рассматриваемых режимов время пребывания продуктов сгорания в канале составляло менее 10 мс.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Наиболее важным показателем эффективности процесса горения является полнота сгорания $\eta_{\Sigma} = Q_{\text{хим}}/H_u^0$ [12]. Здесь $Q_{\text{хим}}$ — количество теплоты, фактически выделившееся при сгорании 1 кг ЭКС. Параметр η_{Σ} по сути является интегральным коэффициентом использования энергии при сгорании ЭКС и характеризует не только степень завершенности химических реакций, но и потери выделяемой теплоты.

При горении обогащенных топливно-воздушных смесей (коэффициент избытка воздуха $\alpha = G_{\text{в}}/(L_0 G_{\text{ЭКС}}) < 1$) использование зависимости $\eta_{\Sigma} = Q_{\text{хим}}/H_u^0$ некорректно, так как в этом случае даже при полном сгорании ЭКС в канале может выделиться не более αH_u^0 теплоты. Здесь $G_{\text{в}}$ — массовый расход воздуха, $G_{\text{ЭКС}}$ — средний массовый расход ЭКС за интервал времени с момента окончания работы воспламенителя заряда ГГ до окончания работы ГГ, L_0 — стехиометрическое соотношение для топливной смеси. Таким образом, для определения интегрального коэффициента использования энергии целесообразно применять соотношение $\eta_{\Sigma} = Q_{\text{хим}}/Q_{\text{max}}$, где Q_{max} — максимально возможное тепловыделение при сгорании ЭКС с воздухом в предположении отсутствия диссоциации продуктов сгорания [13].

В случае первичного горения (газификации) ЭКС в ГГ возникает необходимость учета выделяемой при этом теплоты $Q_{\text{ГГ}}$. Примем, что первичное горение протекает до термодинамического равновесия. В этом случае Q_{max} можно вычислить по зависимости

$$Q_{\text{max}} = H_u^0 \alpha^{\gamma} + Q_{\text{ГГ}}(1 - \alpha^{\gamma}), \quad (1)$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha < 1, \\ 0 & \text{при } \alpha \geq 1. \end{cases}$$

Для представления коэффициента η_{Σ} в качестве базового будем использовать уравнение $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ф}} \eta_{\text{дис}} \eta_{\text{w}}$, где $\eta_{\text{ф}}$, $\eta_{\text{дис}}$, η_{w} — коэффициенты, учитывающие физико-химическое недогорание топливной смеси, потери на диссоциацию и теплоотвод в стенки канала соответственно. Потери на диссоциацию продуктов сгорания рассчитываются относительно Q_{max} , в то время как коэффициент, учитывающий физико-химическое недогорание продуктов газификации ЭКС, является отношением тепловыделения к величине $H_u = Q_{\text{max}} - \Delta Q_{\text{дис}}$. Здесь H_u (в отличие от H_u^0) — теплота, выделяемая при полном сгорании топливной смеси в условиях, реализуемых в процессе горения.

При обработке экспериментальных данных следует учитывать потери тепла в стенки канала РУ. Количественным показателем теплоотвода в стенки является значение удельных тепловых потерь $\Delta Q_{\text{ст}}$. В эксперименте их можно оценить «снизу» и «сверху» следующим образом:

$$\Delta Q_{\text{ст}}^{\text{min}} = \frac{Q_{\text{ст}\Sigma}}{M_{\text{ЭКС}}} \frac{\tau_{\text{ГГ}}}{\tau_{\text{ГВВП}}}, \quad (2)$$

$$\Delta Q_{\text{ст}}^{\text{max}} = \frac{Q_{\text{ст}\Sigma}}{M_{\text{ЭКС}}},$$

$$Q_{\text{ст}\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i c_k (T_i^* - T_i).$$

Здесь $\tau_{\text{ГГ}}$ — время работы ГГ, $\tau_{\text{ГВВП}}$ — время работы ГВВП, $M_{\text{ЭКС}}$ — масса заряда ЭКС, M_i — масса i -го конструктивного элемента канала, n — количество конструктивных элементов канала, c_k — теплоемкость материала конструктивного элемента канала, T_i , T_i^* — температура стенки i -го конструктивного элемента канала до и после эксперимента соответственно.

В соответствии с методикой [11] расчет потерь энергии в стенки канала проводился по уравнениям (2). В этом случае при вычислении

$\eta_{\text{ф}}$ и $\eta_{\text{дис}}$ необходимо учитывать уменьшение Q_{max} на величину $\Delta Q_{\text{ст}}$.

Потери на диссоциацию в значительной степени зависят от состава используемого ЭКС и режимов его горения. Отметим, что определение потерь тепла на диссоциацию в условиях эксперимента может быть выполнено путем математического моделирования термодинамического состояния продуктов сгорания. В работе для этой цели использованы вычислительные модули на основе базы данных программного комплекса TERRA [14]. При рассматриваемых температурах $T_{\text{вх}}^*$ для борсодержащих ЭКС значения $\Delta Q_{\text{дис}}$ могут составлять $14 \div 27$ % от H_u^0 . При повышении $T_{\text{вх}}^*$ значения $\Delta Q_{\text{дис}}$ растут. Однако при расширении продуктов сгорания в сопле ПВРД (при котором возможно значительное охлаждение газа) потери на диссоциацию продуктов сгорания снижаются вследствие рекомбинации.

Основным показателем совершенства процесса сгорания в камере дожигания продуктов газификации ЭКС является коэффициент $\eta_{\text{ф}}$, учитывающий физико-химическое недогорание. Значение $\eta_{\text{ф}}$ зависит от особенностей газодинамической картины течения в камере, качества перемешивания продуктов газификации ЭКС с воздушным потоком, значений режимных параметров рабочего процесса (статическое давление, температура торможения, коэффициент избытка воздуха), свойств частиц конденсированной фазы (химический состав, диаметр, начальная температура), а также от химической неравновесности при горении.

Анализ эффективности процесса горения в РУ основан на сопоставлении полученных в различных экспериментах значений приращения удельного импульса потока в выходном сечении сопла ΔI_y [11] после включения ГГ (относительно импульса потока при работе ГВВП без ГГ) и сравнении экспериментальных значений статического давления по длине канала с их расчетными значениями в соответствующих точках, полученными при различных коэффициентах полноты сгорания ЭКС.

Эмпирическое значение приращения удельного импульса потока в выходном сечении сопла экспериментальной установки $\Delta I_{y,э}$ (в случае безотрывного течения) определяется из уравнения

$$\Delta I_{y,э} = \frac{R_1}{G_{\text{в}} + G_{\text{ЭКС}}} - \frac{R_0}{G_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где R_1 — средняя сила, действующая на динамометрическую платформу за время работы ГГ на установившемся режиме, R_0 — сила, действующая на динамометрическую платформу при работе ГВВП без ГГ.

Согласно результатам исследования [11] для расчета значения $\Delta I_{y,р}$ целесообразно использовать многозонные модели неполного сгорания горючего. Однако в случае двухфазного рабочего тела требуется учитывать, что горение газовой и конденсированной фаз протекает параллельно.

Неопределенность в расчете коэффициента полноты сгорания при $\alpha < 1$ обуславливает необходимость использования интегрального показателя $\eta_{\text{ф}}$, рассчитанного в соответствии с методикой [13], где основным критерием является количество воздуха, вступившего в реакцию.

Однако для наиболее часто встречающихся режимов при $\alpha \geq 1$, в отличие от сгорания газообразных и жидких горючих, в случае применения ЭКС требуется анализ сгорания как газовой, так и конденсированной фазы. Для этого разработана многозонная модель, схема которой представлена на рис. 3.

Согласно этой схеме в каждом сечении канала РУ рабочее тело представляет собой смесь воздуха, газовой и конденсированной фаз продуктов газификации ЭКС, а также продуктов их сгорания с воздухом. В модель введены следующие обозначения массовых концентраций каждого из компонентов рабочего тела: $g_{\text{в}}$ — воздуха, $g_{\text{ЭКС,к}}$ — конденсированной фазы продуктов газификации ЭКС, $g_{\text{ЭКС,г}}$ — газовой фазы продуктов газификации ЭКС, $g_{\text{п,г}}$ — продуктов сгорания газовой фазы ЭКС, $g_{\text{п,к}}$ — продуктов сгорания конденсированной фазы ЭКС.

Концентрации компонентов могут быть связаны с коэффициентами, учитывающими физико-химическое недогорание газовой $\eta_{\text{ф,г}}$ и конденсированной $\eta_{\text{ф,к}}$ фаз в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned} g_{\text{ЭКС,к}} &= z_{\text{ГГ}} \frac{1 - \eta_{\text{ф,к}}}{1 + \alpha L_0}, \\ g_{\text{ЭКС,г}} &= (1 - z_{\text{ГГ}}) \frac{1 - \eta_{\text{ф,г}}}{1 + \alpha L_0}, \\ g_{\text{п,к}} &= z_{\text{ГГ}} \frac{\eta_{\text{ф,к}}(1 + L_{0\text{к}})}{1 + \alpha L_0}, \\ g_{\text{п,г}} &= (1 - z_{\text{ГГ}}) \frac{\eta_{\text{ф,г}}(1 + L_{0\text{г}})}{1 + \alpha L_0}, \end{aligned} \quad (4)$$

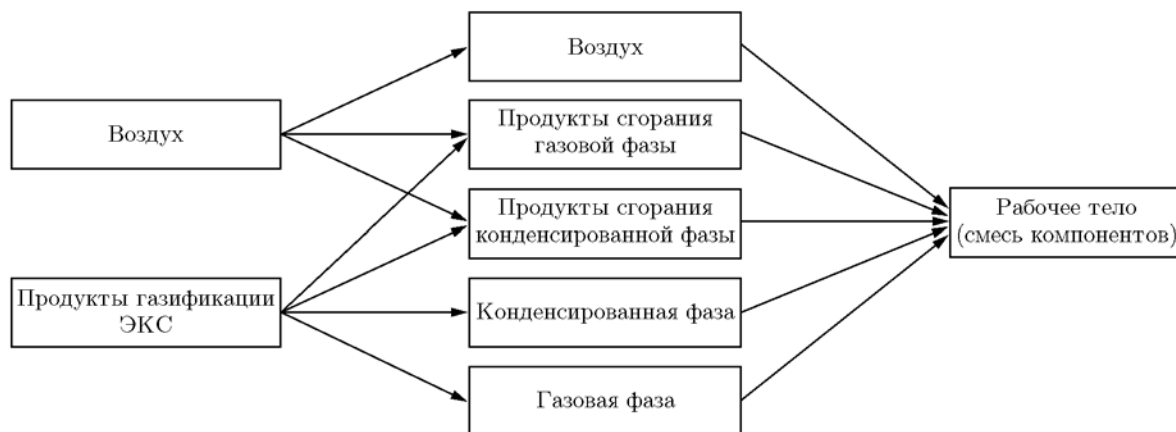


Рис. 3. Схема многозонной модели горения продуктов газификации ЭКС в воздухе

$$g_{\text{в}} = 1 - g_{\text{ЭКС,к}} - g_{\text{ЭКС,г}} - g_{\text{п,к}} - g_{\text{п,г}}.$$

Здесь $L_{0\text{к}}$, $L_{0\text{г}}$ — стехиометрические соотношения соответственно для конденсированной и газовой фаз продуктов газификации ЭКС при горении с воздухом, $z_{\text{ГГ}}$ — массовая доля конденсированной фазы в продуктах газификации ЭКС в выходном сечении ГГ. В этом случае справедливо соотношение $L_0 = (1 - z_{\text{ГГ}})L_{0\text{г}} + z_{\text{ГГ}}L_{0\text{к}}$.

Расчетное значение приращения удельного импульса потока в выходном сечении сопла экспериментальной установки $\Delta I_{\text{у,р}}$ при неполном сгорании как газовой, так и конденсированной фазы продуктов газификации ЭКС определяется согласно уравнению

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{у,р}} = & g_{\text{ЭКС,г}} I_{\text{ЭКС,г}} + g_{\text{п,к}} I_{\text{п,к}} + \\ & + g_{\text{п,г}} I_{\text{п,г}} + g_{\text{в}} I_{\text{в}} - \frac{\alpha L_0}{1 + \alpha L_0} I_{\text{в0}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь приняты следующие обозначения удельных импульсов каждого из компонентов смеси: $I_{\text{ЭКС,г}}$ — газовой фазы продуктов газификации ЭКС, $I_{\text{п,к}}$, $I_{\text{п,г}}$ — продуктов сгорания конденсированной и газовой фаз ЭКС соответственно, $I_{\text{в}}$ — воздушного потока. Значения указанных удельных импульсов соответствуют температуре равновесия и экспериментально зафиксированному давлению в канале РУ при заданной геометрии сопла и реализации изэнтропического течения в сопле. Удельный импульс экспериментальной установки до включения ГГ $I_{\text{в0}}$ определяется для высокоэнтальпийного воздушного потока в сопле установки.

Изменение полноты сгорания по длине канала вычисляется путем сопоставления статических давлений, полученных расчетным и экспериментальным путем. Для расчета распределения статического давления по длине канала постоянного сечения используется система уравнений, включающая уравнения сохранения энергии, импульса движения и массового расхода:

$$\begin{aligned} & g_{\text{ЭКС,г}} H_{\text{ЭКС,г}} + g_{\text{ЭКС,к}} H_{\text{ЭКС,к}} + g_{\text{п,к}} H_{\text{п,к}} + \\ & + g_{\text{п,г}} H_{\text{п,г}} + g_{\text{в}} H_{\text{в}} + \frac{w^2}{2} = \\ & = H_{\text{в}}^* \frac{\alpha L_0}{1 + \alpha L_0} + H_{\text{ЭКС}}^* \frac{1}{1 + \alpha L_0} - \Delta Q_{\text{ст}} \frac{x}{x_{\text{к}}}, \quad (6) \\ & w + \frac{p}{\rho w} = I, \end{aligned}$$

$$\rho w F = (G_{\text{в}} + G_{\text{ЭКС}})(1 - g_{\text{ЭКС,к}}).$$

Здесь $H_{\text{ЭКС,г}}$, $H_{\text{ЭКС,к}}$, $H_{\text{п,к}}$, $H_{\text{п,г}}$, $H_{\text{в}}$ — статические составляющие энтальпии соответствующих компонентов смеси при равновесной температуре в каждом сечении канала; $H_{\text{в}}^*$, $H_{\text{ЭКС}}^*$ — полная энтальпия воздушного потока и продуктов газификации ЭКС в начальном сечении; w — осевая скорость потока в сечении канала; p , ρ — давление и плотность газовой смеси; x — осевая координата; $x_{\text{к}}$ — длина канала; I — приведенный к единице массового расхода импульс потока в канале; F — площадь поперечного сечения канала. Система (6) замыкается уравнением состояния $p = \rho RT$,

где R — газовая постоянная для смеси компонентов рабочего тела при соответствующих рассматриваемому сечению РУ условиях.

Для определения I используются экспериментальные значения удельного импульса в режиме горения продуктов газификации ЭКС в канале РУ. При этом осуществляется пересчет приведенного к единице массового расхода импульса потока в канале с учетом допущений изэнтропического течения в сопле установки. Отметим, что система уравнений (6) справедлива, если потери импульса на трение пренебрежимо малы, в противном случае требуется вводить соответствующую поправку. Оценки согласно методике [15] показывают, что для рассматриваемой установки потери импульса единицы массы потока на трение рабочего тела о стенки канала не превышают 4 % от I .

Возможность использования данной методики подтверждается удовлетворительным совпадением полученных значений коэффициентов $\eta_{ф,г}$ и $\eta_{ф,к}$ в выходном сечении канала с результатами их оценки на базе экспериментальных измерений удельного импульса.

Отметим, что для определения $\eta_{ф,к}$ требуется знать значения $\eta_{ф,г}$ в каждом сечении канала. Анализ экспериментальных данных [16, 17] для газообразных и псевдогазообразных горючих (водород, метан, испаренный керосин и другие углеводороды) показал, что горение в канале с дозвуковым течением высокочастотного воздушного потока протекает в диффузионном режиме. Такой режим сохраняется как при спутном с воздушным потоком, так и при перпендикулярном к нему направлении подачи горючего. С учетом подобия протекания физико-химических процессов закономерности, полученные для газообразных и псевдогазообразных горючих, могут быть использованы для описания горения газовой фазы продуктов газификации ЭКС. Статистическая обработка экспериментальных значений коэффициента полноты сгорания показывает, что с высокой степенью корреляции (относительное среднеквадратичное отклонение не более 10 %) может быть применена обобщенная модель, предложенная в [16]:

$$\eta_{ф,г} = 1 - \exp^{k(Z+1)}, \quad Z = \frac{XY}{\sqrt{L}}, \quad \bar{L} = \frac{L_{0г}}{L_{усл}},$$

$$X = x \sqrt{\frac{\pi N}{4F_0}} / \sqrt{F_X}, \quad \bar{F}_X = \frac{F}{F_0},$$

$$F_x = \int_0^x F(x) dx / x, \quad Y = \left(\frac{\alpha^\nu}{\alpha_{усл}} \right)^j \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_{усл}}}, \quad (7)$$

$$j = 0 \text{ при } \alpha \geq \alpha_{усл}, \quad j = 1 \text{ при } \alpha < \alpha_{усл},$$

$$\nu = 1 \text{ при } 1 < \alpha < \alpha_{усл}, \quad \nu = -1 \text{ при } \alpha < 1.$$

Здесь $k = -0.13 \div -0.06$ — коэффициент, учитывающий сгорание газообразной смеси в обратно-вихревом течении, образующемся перед местом подачи продуктов газификации ЭКС; Z — приведенная эквивалентная длина канала; \bar{L} — относительный стехиометрический коэффициент; $L_{усл} = 34.5$ — условный стехиометрический коэффициент; X — эквивалентная длина канала; Y — теоретическая функция, обратная изменению длины пламени в диапазоне режимов работы $\alpha = 0 \div \infty$; $\alpha_{усл} = 2.5$ — условный коэффициент избытка воздуха; \bar{F}_X — относительная площадь канала; F_0 — площадь канала в месте подачи продуктов газификации ЭКС; N — число сопел подачи продуктов газификации ЭКС.

Таким образом, получив распределения значений $\eta_{ф}$ и $\eta_{ф,г}$ по длине канала, можно оценить распределение $\eta_{ф,к}$. Представленная математическая модель позволяет проводить обработку экспериментальных данных с целью определения полноты сгорания как газовой, так и конденсированной фазы продуктов газификации ЭКС вдоль канала постоянного сечения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Выполнены эксперименты при параметрах, характерных для ПВРД: $T_{вх}^* = 450 \div 1500$ К, статическое давление в канале $0.2 \div 0.5$ МПа, скорость потока $w = 220 \div 280$ м/с.

Для повышения степени обобщения, в соответствии с предложенным методическим подходом, проведена также обработка результатов экспериментов других авторов [18–20] и ранее опубликованных эмпирических данных [21].

В качестве ЭКС использован модельный состав с массовым содержанием бора около 30 %. Согласно термодинамическим расчетам в продуктах газификации ЭКС массовое содержание конденсированной фазы составляет $\varepsilon_{гг} \approx 60$ %. В состав конденсированной фазы в

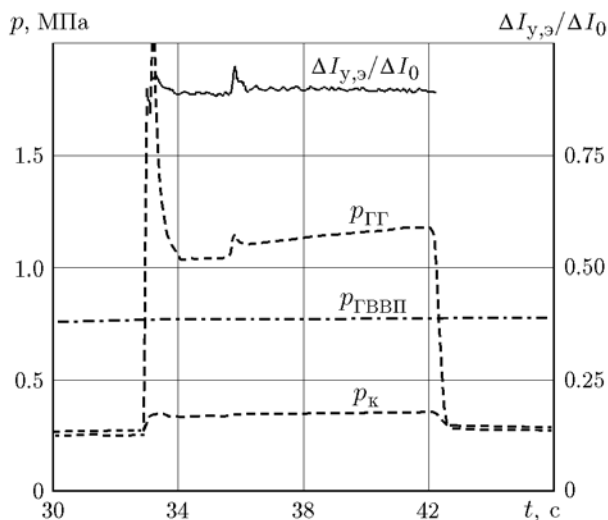


Рис. 4. Изменение измеренных в ходе эксперимента основных параметров при $\alpha \approx 1.5$

основном входит карбид бора (B_4C), в небольших количествах присутствуют углерод (C), нитрид бора (BN) и химически инертные оксиды различных элементов. Газовая фаза продуктов газификации состоит из оксида углерода (CO), метана (CH_4), прочих углеводородов, а также низших и высших оксидов бора и других химических элементов. Стехиометрические коэффициенты газовой и конденсированной фаз продуктов газификации модельного ЭКС составляют $L_{0г} = 5.85$, $L_{0к} = 7.96$.

Изменение измеренных в ходе эксперимента значений основных параметров (давления в ГГ $p_{ГГ}$, давления в ГВВП $p_{ГВВП}$ и статического давления в выходном сечении канала $p_{к}$) иллюстрирует рис. 4. На рисунке показано также изменение отношения $\Delta I_{y,э}/\Delta I_0$. Здесь ΔI_0 — расчетное значение приращения удельного импульса потока в выходном сечении сопла при полном сгорании и термодинамически равновесном составе газа в канале (с учетом уменьшенной на величину $\Delta Q_{ст}$ полной энтальпии ЭКС). В экспериментах получено, что в рассмотренном диапазоне $\alpha = 1.0 \div 2.5$ осредненное по времени значение отношения равно $\Delta I_{y,э}/\Delta I_0 = 0.82 \div 0.95$, что указывает на значительную незавершенность физико-химических процессов в канале.

Характерное распределение статического давления по длине канала, приведенного к статическому давлению в ГВВП, показано на рис. 5. Для рассматриваемого режима до включения ГГ относительное давление в канале на-

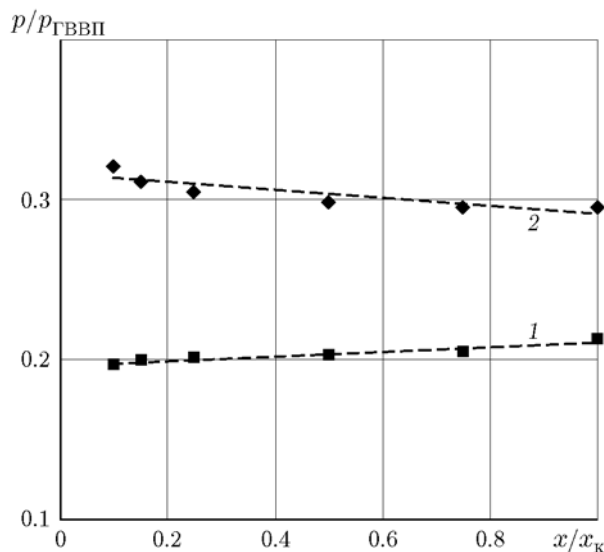


Рис. 5. Распределение относительного статического давления рабочего тела по длине канала:

1 — до включения газогенератора, 2 — после его включения

ходится на уровне $p/p_{ГВВП} \approx 0.19 \div 0.21$, а после включения повышается до $p/p_{ГВВП} \approx 0.29 \div 0.32$. При этом характер распределения давления по длине до включения и после включения ГГ существенно различается. В частности, до включения ГГ осуществляется распределенный по длине отвод тепла от дозвукового потока посредством теплообмена со стенками канала РУ, что дает некоторый рост давления в зависимости от координаты $x/x_{к}$. Во время работы ГГ, напротив, преобладающим становится распределенное по длине канала выделение тепла за счет догорания в воздушном потоке продуктов газификации конденсированного состава, что приводит к «тепловому дросселированию» и снижению относительного давления в зависимости от координаты $x/x_{к}$.

Расчеты, выполненные в соответствии с эмпирическими зависимостями (7), показывают, что при рассматриваемой конфигурации проточного тракта и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ значение $\eta_{ф,г}$ в конечном сечении канала ($x = x_{к}$) составляет ≈ 0.98 (рис. 6, а). С увеличением коэффициента избытка воздуха величина $\eta_{ф,г}$ растет, что является следствием более качественного перемешивания газовой фазы продуктов газификации ЭКС с высокоэнтальпийным воздушным потоком. Таким образом, при $\alpha = 1.5 \div 2.5$ значение $\eta_{ф,г} = 0.98$ мо-

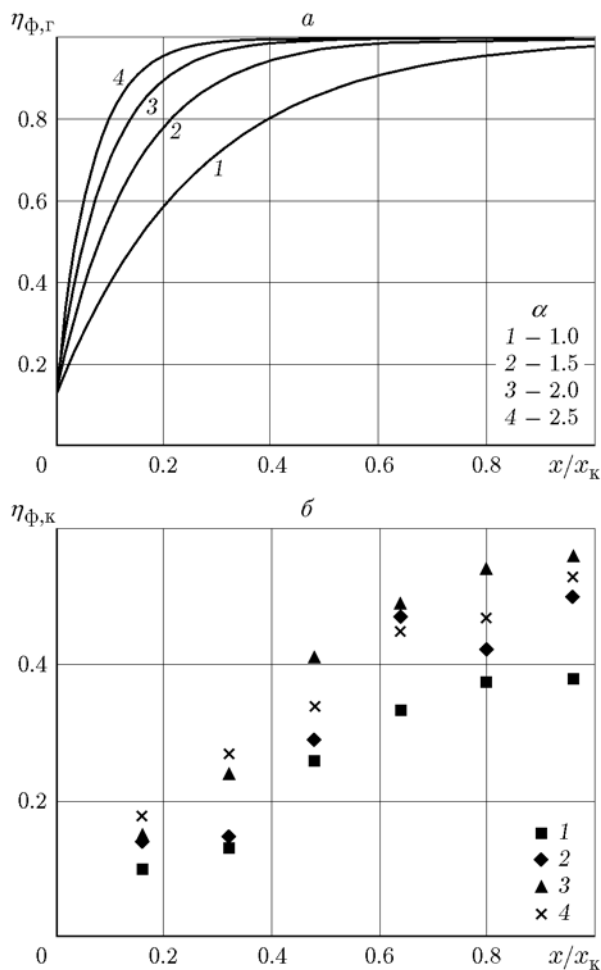


Рис. 6. Изменение по длине канала полноты сгорания газовой (а) и конденсированной (б) фаз

жет быть получено уже при меньшей относительной длине ($x/x_k = 0.3 \div 0.6$).

Совместное решение уравнений (4)–(7) позволяет на основе анализа экспериментально зафиксированного распределения статического давления определить изменение $\eta_{\phi,к}$ по длине канала (рис. 6, б). В выходном сечении канала $\eta_{\phi,к} \leq 0.5$. Это указывает на значительно меньшую скорость сгорания конденсированной фазы относительно газовой фазы.

На рис. 7 видно, что с повышением коэффициента избытка воздуха до значений $\alpha = 2 \div 2.3$ полнота сгорания $\eta_{\phi,к}$ растет. Такая тенденция связана с повышением концентрации кислорода (по всей длине канала РУ) по сравнению с режимами $\alpha = 1 \div 1.5$. Дальнейшее повышение α приводит к снижению температуры продуктов сгорания и уменьшению

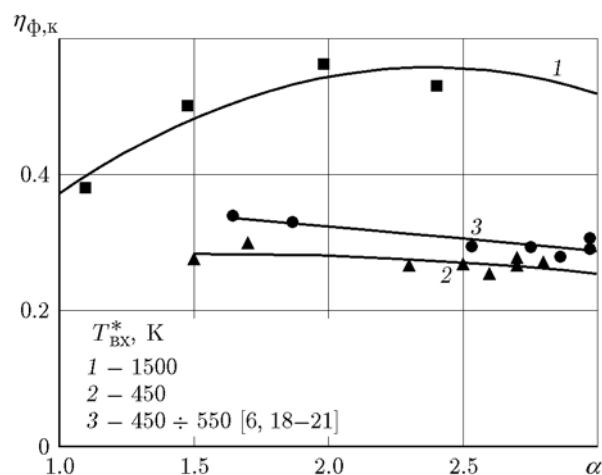


Рис. 7. Зависимость полноты сгорания конденсированной фазы в выходном сечении канала от коэффициента избытка воздуха при различных температурах на входе в канал

$\eta_{\phi,к}$, что свидетельствует о лимитировании скорости горения частиц в этом диапазоне интенсивностью химических реакций. Таким образом, можно сделать вывод, что при $T_{вх}^* \approx 1500$ К горение частиц борсодержащих элементов протекает в диффузионно-кинетическом режиме.

Сопоставление полученных значений $\eta_{\phi,к}$ с результатами обработки экспериментов других авторов [6, 18–20] и с ранее опубликованными данными [21] показывает, что повышение температуры воздушного потока от $T_{вх}^* = 450 \div 550$ К до $T_{вх}^* \approx 1500$ К приводит к росту $\eta_{\phi,к}$ в 1.8 \div 2.1 раза (см. рис. 7). Также отметим, что при $T_{вх}^* = 450 \div 550$ К повышение α от 1.5 до 2.8 приводит к снижению $\eta_{\phi,к}$. Это является следствием того, что при данных условиях в канале реализуются температуры газа ниже 2400 К, и горение конденсированной фазы продуктов газогенерации протекает в кинетическом режиме.

Оценку возможной погрешности косвенных измерений коэффициента полноты сгорания конденсированной фазы $\Delta\eta_{\phi,к}$ можно выполнить по уравнению

$$\Delta\eta_{\phi,к} = \left[\left(\frac{\partial\eta_{\phi,к}}{\partial p} \Delta p \right)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{\phi,к}}{\partial F_{кр}} \Delta F_{кр} \right)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{\phi,к}}{\partial F} \Delta F \right)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{\phi,к}}{\partial G_{в}} \Delta G_{в} \right)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{\phi,к}}{\partial G_{\text{ЭКС}}} \Delta G_{\text{ЭКС}} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Здесь Δp — погрешность измерения статического давления, $F_{кр}$ — площадь критического сечения, $\Delta F_{кр}$ — погрешность измерения площади критического сечения, ΔF — погрешность измерения площади канала, $\Delta G_{в}$, $\Delta G_{ЭКС}$ — погрешности измерения расходов воздуха и ЭКС. Согласно полученным количественным оценкам относительная погрешность определения полноты сгорания конденсированной фазы составляет $\varepsilon = (\Delta\eta_{ф,к}/\eta_{ф,к}) \cdot 100\% = 4 \div 6\%$.

Проведенные отборы проб показали, что в конденсированной фазе продуктов газификации модельного состава ЭКС содержатся частицы, средние объемно-поверхностные диаметры которых лежат в диапазоне $D_{32} = 20 \div 60$ мкм. Для данного диапазона D_{32} можно принять, что скоростная неравновесность частиц и газа в канале будет незначительной. Следует отметить, что траектории движения большинства частиц не пересекаются со стенкой, о чем свидетельствует незначительное количество осажденных на стенках частиц и отсутствие явно выраженных следов эрозии в канале.

Для оценки линейной скорости горения частиц конденсированной фазы примем, что их распределение по размерам является монофракционным ($D_{32} = 40$ мкм). В этом случае справедливо уравнение, устанавливающее взаимосвязь между линейной скоростью горения частиц $u_{ч}$ и значениями $\eta_{ф,к}$:

$$\eta_{ф,к} = 1 - \left(1 - \int_0^x \frac{u_{ч}}{w} dx / D_{32}\right)^3. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) совместно с системой (4)–(7) дает возможность оценить линейную скорость горения частиц конденсированной фазы продуктов газификации модельного ЭКС при различных режимах (рис. 8).

Видно, что при $D_{32} = 40$ мкм характерная линейная скорость горения частиц конденсированной фазы составляет $u_{ч} = 0.5 \div 3.5$ мм/с. При этом по длине канала РУ имеется максимум $u_{ч}$. Рост $u_{ч}$ в начале канала определяется повышением температуры газа, а дальнейшее снижение $u_{ч}$ является следствием уменьшения концентрации кислорода в газе. Увеличение коэффициента избытка воздуха в диапазоне $\alpha = 1 \div 2$ приводит к росту $u_{ч}$. Дальнейшее повышение α негативно отражается на скорости горения частиц. Кроме того, увеличение α при-

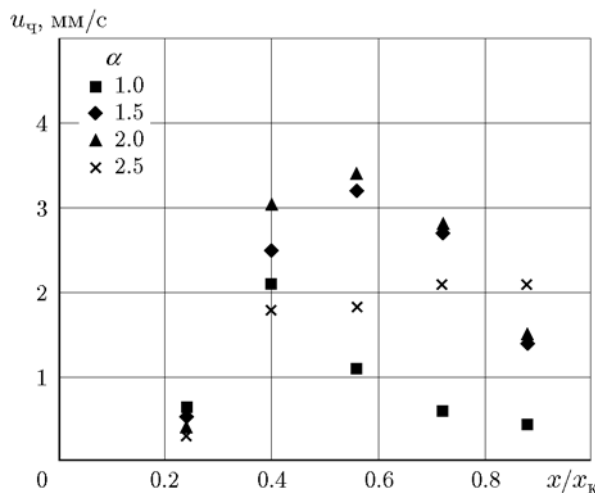


Рис. 8. Изменение линейной скорости горения частиц по длине канала рабочего участка при $T_{вх}^* \approx 1500$ К

водит к смещению максимума $u_{ч}$ в сторону выходного сечения канала.

Как отмечено выше, допустимо предположить, что горение частиц при $T_{вх}^* \approx 1500$ К протекает в диффузионно-кинетическом режиме [8, 19]. В этом случае можно использовать упрощенную зависимость для линейной скорости горения частиц конденсированной фазы вида $u_{ч} = kC$. Здесь k — константа скорости реакции, C — концентрация кислорода вблизи частицы.

В частности, аппроксимация экспериментальных данных показала, что при температурах газа вблизи частицы $T < 2400$ К константа скорости химической реакции может быть оценена согласно уравнению $k = k_0 \exp(T/T_0)$, где $T_0 = 293$ К, $k_0 = (1.5 \div 2.7) \cdot 10^{-3}$ мм/с. При более высоких температурах газа константа скорости реакции практически постоянна и равна $k = 6.5 \div 8.2$ мм/с. Это указывает на то, что при $T < 2400$ К линейная скорость горения частиц зависит как от температуры, так и от концентрации кислорода вблизи частицы, а при $T > 2400$ К — преимущественно от концентрации кислорода. Эксперименты показывают, что в рассматриваемом диапазоне условий константа скорости реакции слабо зависит от давления в канале.

Полученные экспериментальные данные и результаты их анализа могут быть использованы при имитационном моделировании рабочего процесса в камере дожигания ПВРД.

ВЫВОДЫ

В результате проведения экспериментального и расчетно-теоретического анализа процесса горения двухфазных продуктов газификации ЭКС в воздушном потоке установлено следующее.

1. При определении эффективности процесса горения продуктов предварительной газификации ЭКС в воздушном потоке целесообразно отдельно оценивать полноту сгорания как газовой, так и конденсированной фазы.

2. С помощью разработанных экспериментальной установки и методики обработки данных на основе многозонной модели горения определены коэффициенты полноты сгорания конденсированной фазы продуктов газификации борсодержащего ЭКС при температурах торможения высокоэнтальпийного воздушно-го потока во входном сечении канала $T_{\text{вх}}^* = 450 \div 1500$ К. В выходном сечении канала значение коэффициента, учитывающего физико-химическое недогорание газовой фазы, составляет $\eta_{\text{ф,г}} \approx 0.98$, а конденсированной — $\eta_{\text{ф,к}} \approx 0.32 \div 0.55$. Повышение температуры $T_{\text{вх}}^*$ от $450 \div 550$ К до ≈ 1500 К приводит к росту $\eta_{\text{ф,к}}$ в $1.8 \div 2.1$ раза. Установлено, что при $T_{\text{вх}}^* \approx 1500$ К горение борсодержащих частиц протекает в диффузионно-кинетическом режиме.

3. Характерная линейная скорость горения частиц конденсированной фазы лежит в диапазоне $u_{\text{ч}} = 0.5 \div 3.5$ мм/с, причем по длине канала имеется максимум $u_{\text{ч}}$. Рост $u_{\text{ч}}$ в начале канала определяется повышением температуры газа, а дальнейшее снижение $u_{\text{ч}}$ является следствием уменьшения концентрации кислорода в газе. При температурах ниже 2400 К линейная скорость горения частиц зависит как от температуры, так и от концентрации кислорода вблизи частицы, а при температурах выше 2400 К — преимущественно от концентрации кислорода.

Представленные данные экспериментов и результаты их анализа могут быть использованы при проведении расчетного и экспериментального исследования рабочего процесса в энергосиловых установках и создания физико-математических моделей горения частиц конденсированной фазы продуктов газификации ЭКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Wie D., D'Alessio S., White M. Hypersonic airbreathing propulsion // Johns Hopkins APL Techn. Digest. — 2005. — V. 26, N 4. — P. 30–437.
2. Вареных Н. М., Шабунин А. И., Сарабьев В. И. и др. Основные направления разработки твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей с повышенными энерго-баллистическими характеристиками // Боеприпасы и спецхимия. — 2013. — № 1. — С. 44–50.
3. Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance assessment for a throttleable ducted rocket powered lower tier interceptor // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf., Propulsion and Energy Forum. — (AIAA Paper 2015-4234).
4. Александров В. Н., Быцкевич В. М., Верхолотов В. К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / под ред. Л. С. Яновского. — М.: Академкнига, 2006.
5. Францкевич В. П., Яновский Л. С., Бакулин В. Н. и др. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей. — М.: Физматлит, 2009.
6. Sosounov V. A. Research and development of ramjets/ramrockets. Part 1. Integral solid propellant ramrockets // Research and Development of Ram/Scramjets and Turboramjets in Russia. — Loughton, 1994. — P. 10–12. — (AGARD Lecture Ser.; AGARD-LS-194 Dec. 1993).
7. Зуев В. С., Макарон В. С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. — М.: Машиностроение, 1971.
8. Воронежский А. В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии // Наука и образование: электронное науч.-техн. изд. — 2016. — № 1. — <http://technomag.bmstu.ru/doc/830993.htm>.
9. Синярев Г. Б., Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Теория и проектирование. — М.: Оборонгиз, 1957.
10. Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Прохоров А. Н., Федотова К. В., Шаров М. С., Яновский Л. С. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах // Изв. вузов. Машиностроение. — 2016. — № 2. — С. 65–74.
11. Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Ильченко М. А. и др. Исследование эффективности рабочего процесса в малогабаритных генераторах высокоэнтальпийного воздушно-го потока // Наука и образование: электронное науч. изд. — 2015. — № 8. — С. 75–

86. — DOI 10.7463/0815.0798965. — <http://technomag.edu.ru>. — Проверено 01.09.2015.
12. **ГОСТ 23851-79.** Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения.
13. **Аверьков И. С., Александров В. Ю., Арефьев К. Ю. и др.** Особенности определения термодинамических параметров рабочего тела прямоточных воздушно-реактивных двигателей при неполном сгорании топлива // Сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Авиадвигатели XXI века». — М., 2015. — С. 1117–1118.
14. **Трусов Б. Г.** Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Междунар. симпоз. «Горение и плазмохимия», 24–26 августа 2005, Алма-Ата, Казахстан. — 2005. — С. 52–57.
15. **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.
16. **Аннушкин Ю. М.** Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 59–71.
17. **Александров В. Ю., Кукшинов Н. В.** Модифицированная кривая выгорания для модельных высокоскоростных камер сгорания, интегрированных с воздухозаборным устройством // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 32–36.
18. **Сорокин В. А., Захаров Н. Н., Шаров М. С. и др.** Экспериментальные исследования характеристик модели камеры сгорания комбинированной двигательной установки с несимметричным воздухозаборником // Авиакосмическая техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 45–51.
19. **Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И., Шевчук В. Г.** Газификация окиси бора // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 4. — С. 615–618.
20. **Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И.** Высокотемпературное горение неподвижной частицы бора в кислородсодержащей среде // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 4. — С. 556–563.
21. **Яновский Л. С., Разносчиков В. В., Шаров М. С. и др.** Влияние форсирования прямоточного воздушно-реактивного двигателя на твердом горючем на летно-технические характеристики летательного аппарата // Вестн. Моск. авиац. ин-та. — 2013. — Т. 20, № 4. — С. 90–98.

*Поступила в редакцию 8/VIII 2016 г.,
в окончательном варианте — 10/X 2016 г.*
