

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ВСТРЕЧНЫХ СТРУЙ

А. Н. Бажайкин, В. К. Баев, И. П. Гуляев

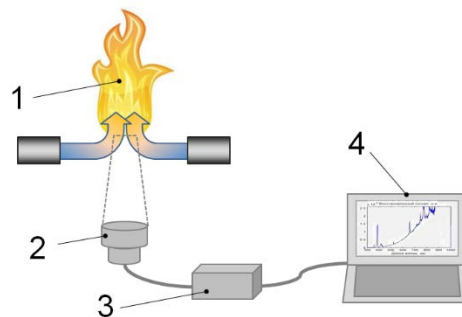
Введение

Горение пересекающихся и встречных струй используется на практике в различных технологиях, в том числе в топочных и горелочных устройствах [1, 2], благодаря ряду преимуществ: повышению диапазона устойчивости процесса, увеличению теплонапряженности, интенсификации передачи тепла в камерах сгорания. В [2] показано, что пределы устойчивости диффузионного горения во встречных струях газообразного топлива расширяются более чем на порядок по сравнению с одиночными свободными струями. Это происходит оттого, что зона взаимного торможения встречных струй является зоной стабилизации пламени, а пределы стабилизации определяются условиями турбулентного обмена и характерным временем горения гомогенной смеси в этой области. Пламя одиночной струи в основном оторвано от сопла и условие его стабилизации определяется равенством скорости истечения топлива U_T и скорости распространения пламени $U_{П}$ в точке «поджога» вблизи сопла: $U_T = U_{П}$. При $U_T > U_{П}$ происходит срыв пламени и горение прекращается [3]. На рис. 1, а показана картина диффузионного горения свободных встречных струй пропан-бутана в воздухе, впрыснутых из сопел диаметром 0.5 мм. Вблизи сопел наблюдается голубое пламя, а зона смешения характеризуется светло-желтым излучением сажистого пламени.

В настоящее время активно развиваются бесконтактные оптические методы измерения температур излучающих объектов, которые включают подходы яркостной и спектральной пирометрии [4–8].



а



б

Рисунок 1 – Горение свободных встречных струй пропан-бутана в воздухе: а – внешний вид области горения, б – схема работы измерительной системы:

1 – область горения встречных струй, 2 – объектив, 3 – фотоспектрометр, 4 – компьютер

Представленная работа направлена на изучение влияния добавок порошковых материалов на температурные характеристики горения свободных встречных струй пропан-бутана в воздухе, а также исследование термического воздействия на проницаемые элементы горелочных устройств.

Оборудование и эксперимент

Эксперименты проводились при значениях расхода топлива $G_T = 0.06 - 0.2$ г/с, диаметр сопел составлял 0.5 мм, расстояние между соплами 20 см. Для исследования температурных характеристик пламен производилась регистрация спектра их излучения в диапазоне 300–1000

нм с помощью фотоспектрометра LR1-T (Aseq). Схема работы измерительной системы представлена на рис. 1, б. Область наблюдения, сформированная фотообъективом, имела диаметр 2 см и могла перемещаться от начала струи до области смещения встречных струй.

Температуры пламён измерялись с использованием двух подходов: спектральной пирометрии – по непрерывной составляющей спектра, и спектроскопии – по полосатой составляющей спектра. На рис. 2 представлены спектры излучения пламени в районе выхода сопла (рис. 2, а) – синее пламя и в области встречи струй (рис. 2, б) – желтое пламя. Синий цвет пламени связан с интенсивными полосами излучения молекул CN/CH (350–432 нм), а также молекул C₂ (437–619 нм). Кроме того, как в синем, так и в желтом пламени присутствует непрерывный спектр, соответствующий закону теплового излучения Планка.

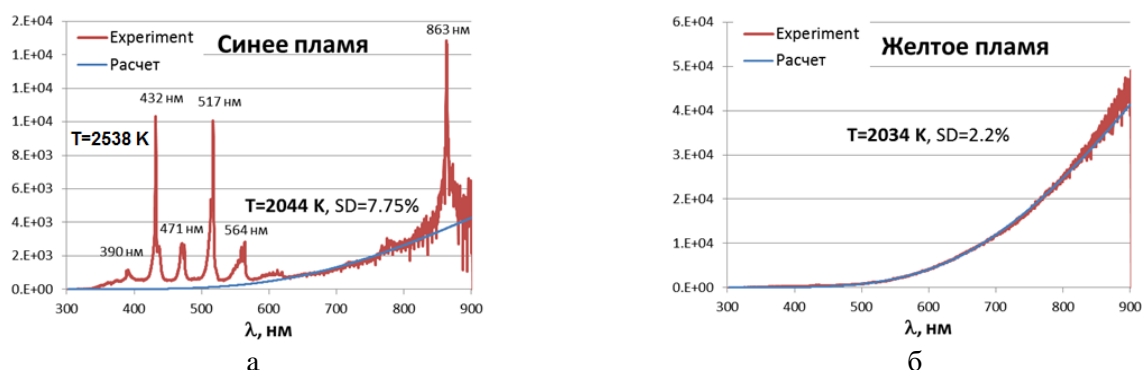


Рисунок 2 – Спектры излучения пламени пропан-бутановых струй:
а – синее пламя вблизи сопла, б – желтое пламя в области смешения струй

При определении температуры пламён по непрерывной составляющей спектра производилась подгонка формулы Планка (в терминах фотонного потока)

$$N(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^4} (EXP(c_2 / \lambda T) - 1)^{-1} \quad (1)$$

к участку зарегистрированного спектра, свободному от полосового излучения газов [9]. Здесь использованы обозначения λ – длина волны излучения, T – температура излучателя, c_1, c_2 – пирометрические постоянные [10]. В расчетах излучательная способность объектов принималась постоянной (приближение серого тела). Кроме того, не рассматривалось влияние неоднородности температурного распределения по области наблюдения. Известно, что метод спектральной пирометрии в таких случаях дает значение температуры, близкое к максимальному [11].

Определение температуры пламени спектроскопическим методом проводилось с помощью подгонки полосатого спектра равновесного излучения молекулярного углерода C₂ (полосы Свана) в диапазоне 450–650 нм [12]. На рис. 3 показано сравнение зарегистрированного спектра и модельного спектра, соответствующего температуре 2538 К (2265 °С).

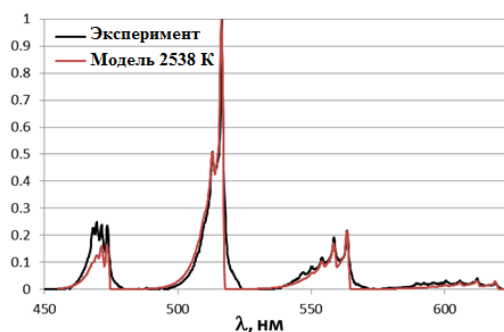


Рисунок 3 – Сравнение участка полосатого спектра, зарегистрированного в эксперименте, и модельного спектра, рассчитанного для молекулярного углерода C₂ при температуре 2538 К

Результаты и обсуждение

При определении температур горения струй в воздухе без добавок частиц порошка были получены следующие результаты. Температура струи вблизи сопла горелки (синее пламя, рис. 2, а), определенная по полосатому спектру составила 2265 °С, определенная по непрерывному спектру (450–800 нм) – 1761 °С. Температура струй в области их смешения (желтое пламя, рис. 2, б) составила 1771 °С. Полученные значения хорошо согласуются со справочными данными по адиабатической (максимальной) температуре горения пропан-бутановой смеси в воздухе, которая составляет 1973÷1988 °С [13]. Высокое значение температуры синего пламени в начальной области струи, определенной по полосатому спектру, можно объяснить тем, что это излучение соответствует температурам компонент газовой смеси, которые принимают непосредственное участие в химической реакции и не успели прийти в тепловое равновесие с остальными компонентами. То есть это полосатое излучение не является равновесным, в отличие от непрерывной составляющей.

Результаты измерения температур с помощью термопары, помещенной в зону взаимодействия струй, лежат в диапазоне 950÷1170°С. Наличие такой большой разницы между температурой пламени и температурой термопары можно объяснить тепловым потоком в холодные концы термопары, а также неучтенными потерями тепла за счет излучения самой термопары.

Исследование влияния различных добавок на горение встречных струй осуществлялось путем подмешивания в пропан-бутановые струи твердых частиц. В качестве добавок использовались порошки двуокиси кремния SiO_2 со средним размером частиц 50 нм; циркона ZrSiO_4 – 50 мкм и молотый древесный уголь. Изображения горящих струй с перечисленными порошками показаны на рис. 4. Результаты измерения температур по непрерывным участкам спектра в потоках с добавлением порошков приведены в таблице 1: указаны средние значения температур по 10 реализациям с доверительными интервалами. Можно видеть, что результаты, полученные по коротковолновому диапазону 400–550 нм, лежат выше результатов измерений по длинноволновому диапазону 600–900 нм, что является типичным для метода спектральной пирометрии при наблюдении объектов с неоднородной температурой [15–19].

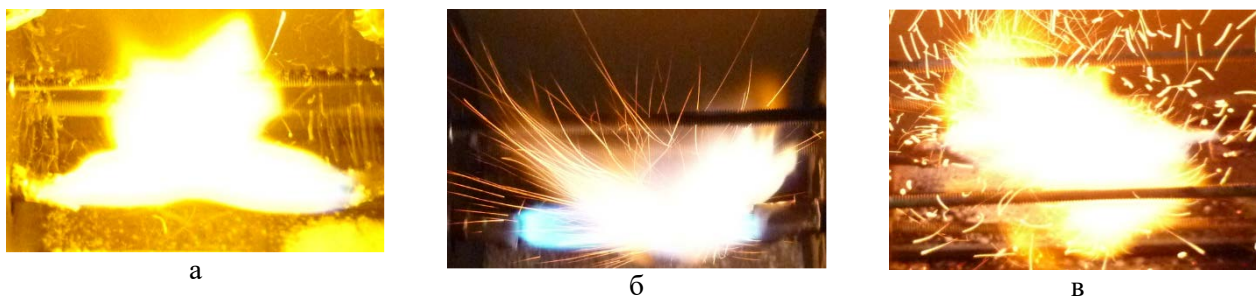


Рисунок 4 – Горение встречных струй с добавками частиц порошка:

а – SiO_2 , б – ZrSiO_4 , в – древесный уголь

Добавка наночастиц SiO_2 (рис. 4, а) дает интенсивную равномерную белую с желтизной окраску всего пламени. Горение с добавками ZrSiO_4 (рис. 4, б) характеризуется интенсивной белой окраской пламени, пронизываемого многочисленными треками раскаленных частиц. Добавка частиц древесного угля (углерода) существенно изменяет картину горения (рис. 4, в): пламя расширяется во все стороны и окружается множеством раскаленных горящих частиц углерода, являющихся топливом (в отличие от частиц SiO_2 и ZrSiO_4).

Таблица 1

Температуры пламён, с добавками дисперсных частиц

Частицы	Размер	Измеренная температура, С	
		Диапазон 400–550 нм	Диапазон 600–900 нм
SiO_2	50 нм	2050±75	1875±50
ZrSiO_4	50 мкм	2000±50	1520±50
С	-	1720±50	1500±30

Эксперименты показали, что, по сравнению с чистым пропан-бутаном, горение с добавками микропорошков имеет ряд особенностей. При одинаковых условиях впрыска топлива горение с частицами более устойчиво, т.к. раскаленные частицы являются дополнительными очагами поджига топливно-воздушной смеси. Наличие частиц интенсифицирует излучение, и пламя становится более ярким и однородным. Организация горения встречных топливных струй с добавками микрочастиц может быть полезной в практических применениях.

Важной для практики характеристикой горения является объемная энергонапряженность в зоне взаимодействия струй

$$q_v = W/V \quad (2)$$

где W – тепловая мощность, приходящаяся на объем пламени V . Значения $W = G_T \cdot q_T$ рассчитывались исходя из расхода топлива G_T и его теплотворной способности q_T , а объем пламени определялся по фотоснимкам струи. В результате проведенных расчетов для разных режимов экспериментов значения q_v составили $20 \div 30$ МВт/м³.

Изучение горения свободных встречных топливных струй осуществлялось с целью их применения в топливосжигающих устройствах различного назначения. В настоящее время разработаны технологии получения новых материалов, таких как высокопроницаемые ячеистопористые материалы (ВПЯМ), пористая проницаемая металлокерамика, получаемая в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и других, которые могут использоваться в качестве элементов горелочных устройств. На рис. 5. показана схема разработанного устройства со встречной подачей топливных струй и переменным направлением подачи воздуха. Горящие струи с двух сторон нагревают проницаемую огнеупорную пластину из корундо-муллитовой ВПЯМ керамики.

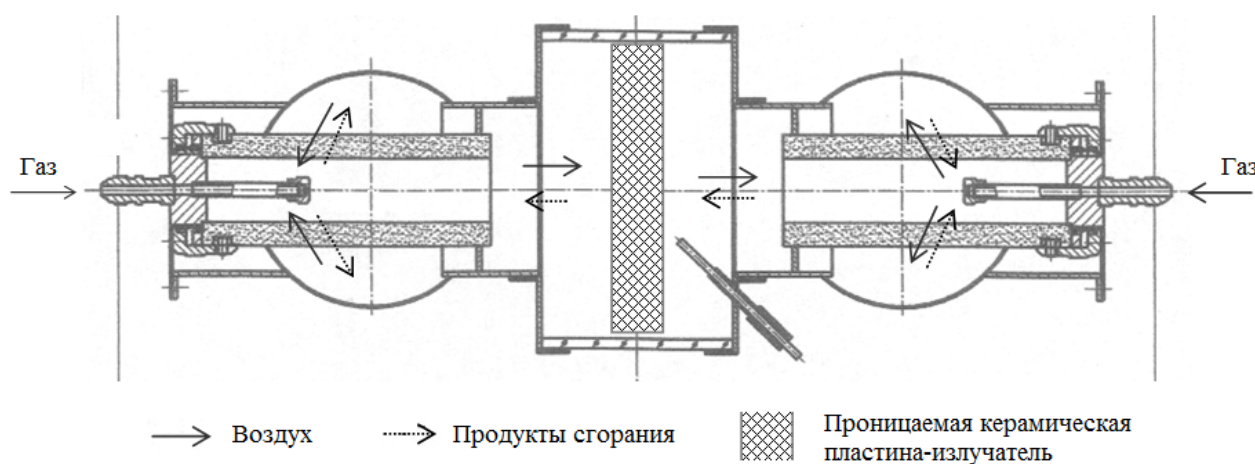


Рисунок 5 – Схема рабочей части камеры сгорания с переменным направлением подачи воздуха

В результате термического воздействия пластина нагревается до 1000°C и служит источником излучения в окружающее пространство через кварцевые окна. В ходе работы установки было установлено, что керамическая пластина разрушается вследствие высоких локальных градиентов температуры, вызванных переменным направлением движения потоков и колебаниями пламени. В результате в камере сгорания образовался порошок окиси алюминия, основное количество частиц которого имеет размеры $1 \div 2$ мкм, в то же время основная масса осколков распределена по диапазону $5 \div 600$ мкм.

Для реализации процесса горения во встречных струях была создана радиационная горелка с использованием жаропрочной СВС-металлокерамики системы NiAl (пористость 65 %, диаметр транспортных пор $0.1 \div 0.5$ мм). Горелка состоит из двух встречно и соосно расположенных сопел 1, заключенных в пористую металлокерамическую трубу 2 (схема на рис. 6).

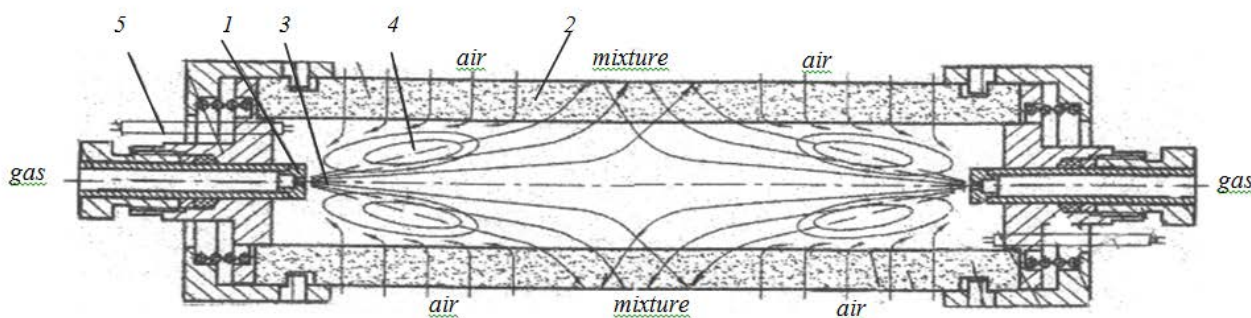
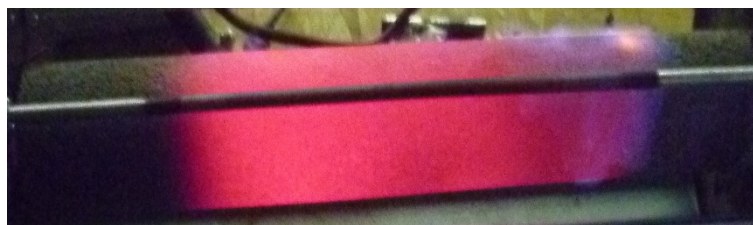


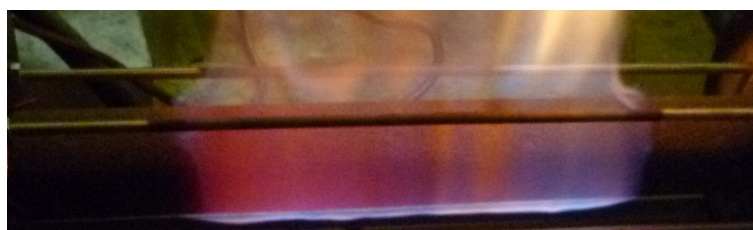
Рисунок 6 – Схема работы горелки с пористой металлокерамической трубой при встречной подаче топливных струй

При впрыске из сопел пропан-бутана образуются струи 3, движение которых вызывает появление градиентов давлений в продольном и поперечном направлениях, под действием которых происходит движение окружающей среды: на начальном участке наружный воздух проходит внутрь через стенку трубы (эжекция) и увлекается в движение вниз по потоку. Струи, достигнув внутренней стенки трубы, резко тормозятся, вызывая появление положительного градиента давления, с образованием возвратного течения и формированием зоны рециркуляции 4, где происходит смешение эжектируемого воздуха и материала струи [14]. Образовавшаяся горючая смесь поджигается запальным устройством 5. Горение встречных струй внутри трубы сопровождается интенсивным разогревом ее стенки, как показано на рис. 6. В зависимости от расхода топлива качественная картина процесса существенно меняется: при стехиометрическом составе смеси топливо полностью сгорает внутри трубы (рис. 7, а). Избыток горючего приводит к догоранию смеси на наружной стенке трубы (рис. 7, б).

Излучающая поверхность трубы сканировалась фотоэлементом разработки ИФП СОРАН, градуированным по температурам [8]. Радиационная мощность горелки рассчитывалась по измеренным температурам излучателя, достигавшим $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, и степени черноты ее поверхности с использованием законов Кирхгофа и Стефана-Больцмана.



а



б

Рисунок 7 – Горение топливных струй в пористой NiAl трубе: а – стехиометрический состав смеси, горение внутри трубы, б – избыток топлива, догорание на внешней поверхности трубы

Отношение радиационной мощности к теплотворной способности смеси в экспериментах достигало 55 %, что является высоким показателем для горелки. Рассчитанная объемная энергонапряженность горелки составила $15\div 20\text{ МВт/м}^3$, причем состояние материала горелки – интерметаллида NiAl после многократных запусков не изменилось: деформаций, трещин, выкрашиваний и оплавлений в результате воздействия высоких температур и их градиентов не обнаружено.

Следует отметить, что труба из СВС-металлокерамики обеспечивает бесшумность работы и высокую термическую стойкость горелки, однако имеет относительно высокое гидравлическое сопротивление эжекции наружного воздуха, что ограничивает ее применение при повышенных расходах топлива, т. к. из-за недостатка окислителя образуется богатая смесь со значительной неполнотой сгорания. По этой причине были проведены испытания горелки с трубой из высокопроницаемого ячеисто-пористого никеля (ВПЯН), имеющего пористость 95 % и размер ячеек 2÷5 мм. На рис. 8 показана картина горения встречных струй пропан-бутана в трубе из ВПЯН. Хорошо виден более интенсивный нагрев трубы ВПЯН по сравнению с трубой из NiAl (рис. 7, б) до температуры 950÷1050°C, локализованный в зоне взаимодействия струй. Энергонапряженность горелки составила 40 МВт/м³, что в 2÷3 раза больше, чем в трубе из СВС-металлокерамики и в 1.5–2 раза больше, чем в свободных струях – при одинаковом расходе топлива. Для сравнения, максимальная энергонапряженность, достигнутая в реакторе Лонгвелла составляет 4000 МВт/м³.



Рисунок 8 – Горение топливных струй в трубе из ВПЯН

Следует отметить, что наряду с отмеченными достоинствами, никелевый ячеистый материал после многократных пусков подвержен эрозии металла и усадке, поэтому для создания горелочных устройств с высокой теплонапряженностью необходимо применение термически стойких материалов с низким гидравлическим сопротивлением.

Заключение

Проведенные комплексные исследования горящих встречных топливных струй в открытом воздухе и проницаемых пористых трубах показали перспективность такого способа организации процессов, выражающуюся в расширении диапазона устойчивого горения и увеличении энергонапряженности в топливосжигающих устройствах, а также в возможности создания бесшумных и безопасных горелок различного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-08-90428, 15-48-00100).

Литература

1. Зайцев, О. Н. Энергосбережение в автономных системах теплоснабжения [Текст] / О. Н. Зайцев // Науковий вісник будівництва. 2000. – № 11. – Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2000. – С. 204–207.
2. Bazhaykin, A. N.; Baev, V. K. Burning in countermoving jets. // Int. Conference on the Methods of Aerophysical Research, June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk, Russia, Abstracts, Part I, p. 27–28.
3. Баев, В. К. Устойчивость диффузионных пламен в затопленных спутных струях [Текст] / В. К. Баев, В. А. Ясаков // Физика горения и взрыва. – 1975. – № 2. – С. 163–178.
4. Долматов, А. В. Виртуальная тепловизионная система с микросекундным периодом регистрации [Текст] / А. В. Долматов, А. О. Маковеев, К. А. Ермаков, В. В. Лавриков // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 31–36.

5. Долматов, А. В. Комплекс автоматизированной калибровки тепловизионной системы на базе MATLAB [Текст] / А. В. Долматов, А. О. Маковеев, К. А. Ермаков, В. В. Лавриков // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 2 (25). – С. 59–63.
6. Долматов, А. В. Диагностика распределения частиц по температурам в технологии плазменного напыления [Текст] / А. В. Долматов, П. Ю. Гуляев, М. П. Бороненко // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 71–73.
7. Бороненко, М. П. Определение основных теплофизических параметров процессов плазменного напыления [Текст] / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. В. Долматов // Вестник Югорского государственного университета. – 2013. – № 2 (29). – С. 7–16.
8. Бороненко, М. П. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напыления [Текст] / М. П. Бороненко [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–10. – С. 2135–2140.
9. Gulyaev, I. P.; Ermakov, K. A.; Gulyaev, P. Yu. New high-speed combination of spectroscopic and brightness pyrometry for studying particles temperature distribution in plasma jets// European Researcher, 2014, № 3–2 (71), p. 564–570.
10. Чернин, С. М. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения [Текст] / С. М. Чернин, А. В. Коган. – М. : Энергия, 1980. – 96 с.
11. Долматов, А. В. Спектральный пирометр для контроля температуры в процессах термосинтеза [Текст] / А. В. Долматов, И. П. Гуляев, Р. Р. Имамов // Вестник Югорского государственного университета. – 2014. – № 2 (33). – С. 32–42.
12. Laux, C. O. Radiation and Nonequilibrium Collisional-Radiative Models. Physico-Chemical Modeling of High Enthalpy and Plasma Flows, Rhode-Saint-Genève, Belgium, 2002.
13. The Coen & Hamworthy Combustion Handbook: Fundamentals for Power, Marine & Industrial Applications (Industrial Combustion). – CRC Press: 2013.
14. Баев, В. К. Исследование термического состояния корпуса радиационной горелки из пронцаемого металлокерамического материала [Текст] / В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, А. Д. Фролов // Доклады V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». – Т. 1. – Новосибирск : Параллель, 2013. – С. 13–16.
15. Temperature measurements for Ni-Al and Ti-Al phase control in SHS Synthesis and plasma spray processes / P. Gulyaev, H. Cui, I. Gulyaev, I. Milyukova // High Temperatures-High Pressures. – 2015. – V. 44. – № 2. – P. 83–92.
16. Бересток, Г. М. Система оптического контроля тепловых параметров процесса СВ-синтеза [Текст] / Г. М. Бересток, П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, И. В. Милукова // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 2–2 (46). – С. 71–81.
17. Экспериментальное исследование процесса плазменно-дугового проволочного напыления / П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев, В. Н. Коржик [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 3–4. – С. 37–43.
18. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напыления [Текст] / М. П. Бороненко, П. Ю. Гуляев, И. П. Гуляев [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–6. – С. 1194–1199.
19. Методы оптической диагностики частиц в высокотемпературных потоках [Текст] / П. Ю. Гуляев, А. В. Долматов, В. А. Попов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 4–7.