

УДК 544.452.42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

© 2015 О. А. Евдокимов, А. И. Гурьянов

Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьёва

Приведены результаты исследований выгорания диффузионных струй, истекающих в неподвижную атмосферу в ламинарном, переходном и турбулентном режимах с направлением начального импульса в диапазоне углов α от 0 до 360° относительно вертикали. Получены данные по влиянию угла α на значения относительной криволинейной длины пламени, её проекций на оси Ox , Oy , координаты положения точки стабилизации пламени в диапазоне чисел Рейнольдса от $Re = 500$ до $Re = 15000$. Результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей в относительном виде и обобщены в форме критериальных уравнений, учитывающих влияние свободной конвекции в рамках теории струйно-факельного горения на положение фронта пламени, геометрию и объём зоны горения. Приведены результаты фотосъёмки процесса горения струй. Предложены рекомендации по повышению полноты сгорания топлива и выбору оптимальных начальных, геометрических и теплофизических параметров струи (число Re , число Fr , относительная длина струи, начальный диаметр струи, положение точки стабилизации пламени, угол к вертикали), обоснованы теплофизические особенности формирования диффузионных реагирующих газовых струй, истекающих в неподвижную атмосферу с учётом влияния свободной конвекции.

Горение, струя, свободная конвекция, фронт пламени, топливо.

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-139-146

Введение

Среди применяемых на практике схем сжигания углеводородных видов топлива, наряду с каталитическим и поверхностным горением, широко распространённой является организация диффузионных и предварительно перемешанных реагирующих газовых струй. В технических приложениях реагирующие диффузионные струи применяются: в камерах сгорания теплоэнергетических котлов различного класса мощности; высокотемпературных технологических процессах нагрева, плавления, осушки и термической обработки поверхностей; технологиях сжигания попутных газов на углеводородных месторождениях; многофакельных горелках камер сгорания конденсационных котлов распределённой энергетики. Диффузионный механизм распространения пламени лежит в основе формирования лесных и техногенных пожаров.

Постановка задачи исследования

Существует несколько подходов к изучению и описанию теплофизических и термохимических особенностей формирования и динамики выгорания топлива в струйных факелах. Подходы, основанные на детальном изучении кинетики протекания совокупности цепных реакций горения, дают возможность получить распределение концентраций и скоростей реакций по длине факела, но не позволяют определять интегральные характеристики горения, такие как протяжённость зоны горения, полнота сгорания, границы срыва пламени, в виде расчётных зависимостей, приемлемых для практического применения. Подход, основанный на описании выгорания реагирующих струй с использованием ряда теплофизических и геометрических критериев, не даёт высокой степени детализации и распределений концентрации реагирующих компонентов и экологических характеристик, однако позволяет получить ряд критериальных

эмпирических зависимостей, обобщающих влияние различных факторов на комплекс отмеченных интегральных характеристик.

Известные и применяемые на практике положения теории струйно-факельного горения [1, 2], обобщающие особенности формирования диффузионных реагирующих струй углеводородных топлив с использованием комплекса теплофизических критериев, содержат ряд критериальных уравнений, описывающих протяжённость реагирующего факела [2]. Отмеченные уравнения получены для вертикально ориентированных струй, формирующихся в условиях совпадения направлений начального импульса струи топлива и силы свободной конвекции.

Во многих технических приложениях, использующих процесс горения, начальный импульс топливных струй ориентирован под углом к вертикали. Это требует введения в список определяющих параметров угла наклона струи и исследования теплофизических особенностей

влияния свободной конвекции на формирование струи в отмеченных условиях.

Схема формирования факела в условиях, когда начальный импульс топливной струи ориентирован под произвольным углом α к вертикали, показана на рис. 1.

В рамках экспериментального исследования в качестве топлива использовался сжатый пропан C_3H_8 . Топливная струя истекала с начальным импульсом, направленным под углом α к вертикали в неподвижную атмосферу, и воспламенялась от внешнего источника энергии. Измерение геометрических характеристик факела l , x , y , h выполнялось с использованием цифровой фоторегистрации в диапазоне выдержки $1/4000 \leq t \leq 5,0$ секунд с осреднением по времени криволинейной длины факела. Угол α варьировался в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 2\pi$. Обобщение экспериментальных данных по влиянию свободной конвекции на теплофизические характеристики факела осуществлялось с помощью чисел Рейнольдса и Фруда.

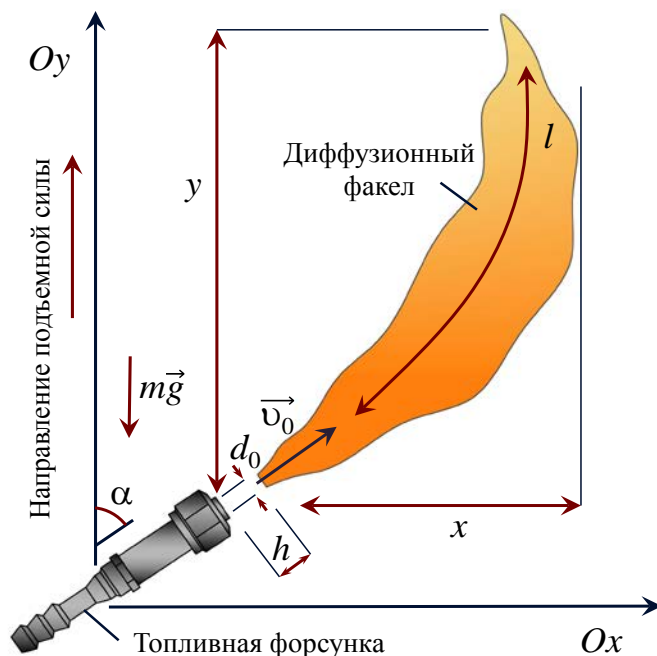


Рис. 1. Схема формирования реагирующего диффузионного факела:

α – угол между направлениями силы инерции и подъемной силы; d_0 – диаметр сопла топливной форсунки; l – криволинейная длина факела; x – проекция длины факела на направление горизонтали (ось Ox); y – проекция длины факела на направление вертикали (ось Oy); h – расстояние от сопла форсунки до точки стабилизации пламени; v_0 – начальная скорость струи

Число Рейнольдса $Re = \frac{v_0 \cdot d_0}{\nu}$ (рассчитанное по диаметру сопла форсунки d_0 и кинематической вязкости топлива) изменялось в диапазоне $500 \leq Re \leq 15000$, число Фруда $Fr = \frac{v_0^2}{g \cdot l}$ рассчитывалось по криволинейной длине факела.

Анализ результатов опытного исследования

Исследования формирования вертикально ориентированных реагирующих струй достаточно подробно освещены в литературе [1-4]. Большинство из них обобщены в работе [1] в виде критериальных зависимостей безразмерной высоты пламени для ламинарного (1) и турбулентного (2) режимов истечения топлива из сопла форсунки:

$$\left(\frac{l}{d_0}\right)_i = 3 \cdot Re^{0,5} \cdot \left(\frac{d_0}{d_*}\right)^{-0,5} \cdot \frac{C_i}{\Delta C_i}; \quad (1)$$

$$\left(\frac{l}{d_0}\right)_t = 34 \cdot Re^{0,2} \cdot \left(\frac{d_0}{d_*}\right)^{-0,5} \cdot \frac{C_i}{\Delta C_i}. \quad (2)$$

Здесь d_* – условный масштаб пламени, $d_* = 0,003$ м [2], C_i – концентрация i -го компонента топлива, ΔC_i – разность концентраций в ядре и на границе струи. В случае использования чистого топлива, например пропана, $C_i/\Delta C_i = 1$ [1].

Результаты опытов показали, что критериальные уравнения (1) и (2) качественно описывают зависимость безразмерной криволинейной длины пламени от режима истечения углеводородного топлива (рис. 2). Однако количественный расчёт в диапазоне углов $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ даёт ошибку более 25%. Полученные результаты подтверждают вывод о том, что зависимости (1) и (2), полученные для горения водорода в воздухе, применимы для адекватного описания факелов других газообразных углеводородных топлив [5].

Важной для практических приложений является оценка положения точки стабилизации пламени. На рис. 3 приведена зависимость относительного расстояния от сопла форсунки до точки стабилизации в виде функции $h/d_0 = f(Re, \alpha)$.

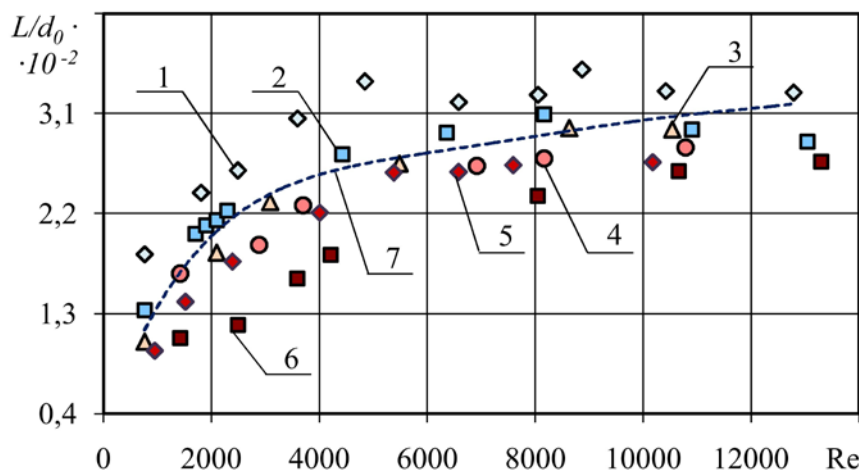


Рис. 2. Зависимость относительной криволинейной длины пламени от числа Re :
 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 0,14\pi$ (25°); 3 – $\alpha = 0,28\pi$ (50°); 4 – $\alpha = 0,36\pi$ (65°); 5 – $\alpha = 0,5\pi$ (90°);
 6 – $\alpha = 0,75\pi$ (135°); 7 – расчёт по уравнениям (1) и (2)

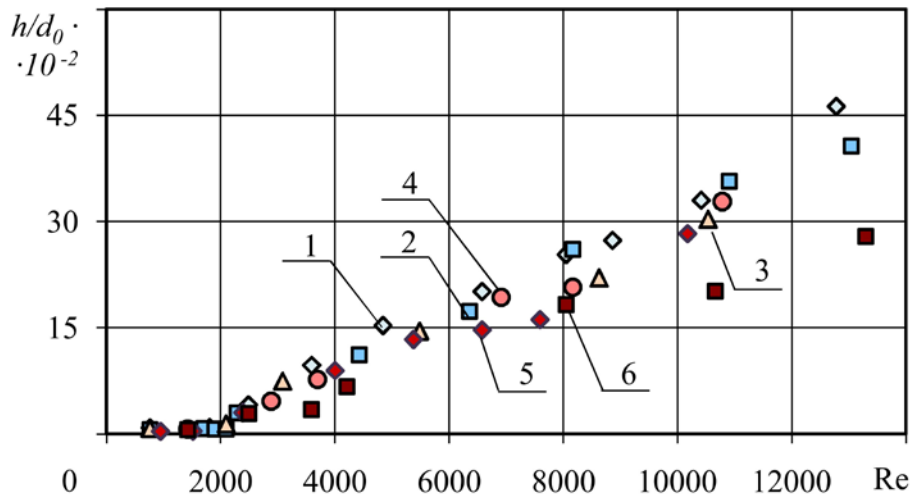


Рис. 3. Зависимость относительной координаты положения точки стабилизации пламени от числа Re :
 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 0,14\pi$ (25°); 3 – $\alpha = 0,28\pi$ (50°); 4 – $\alpha = 0,36\pi$ (65°);
 5 – $\alpha = 0,5\pi$ (90°); 6 – $\alpha = 0,75\pi$ (135°)

В области значений Re , соответствующих ламинарному режиму истечения, начальное направление вектора скорости топливной струи не оказывает влияния на положение точки стабилизации пламени, координата которой зависит от числа Re по линейному закону. При переходе к турбулентному режиму истечения газа появляется явная зависимость $h/d_0 = f(\alpha)$. Её учёт позволяет уменьшить ошибку определения координаты на

25-40%, максимум которой соответствует диапазону чисел Re от 10000 до 14000. Верхнее значение этого диапазона ограничено концентрационным пределом срыва диффузионного факела.

Результаты экспериментальных исследований показали, что свободная конвекция оказывает существенное влияние на формирование факела. Зависимости проекций криволинейной длины факела на оси Ox и Oy показаны на рис. 4, 5.

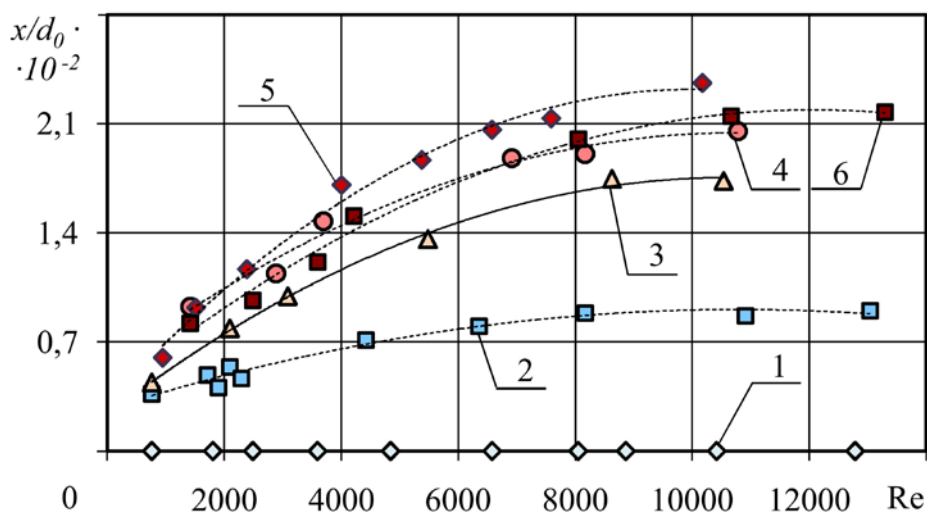


Рис. 4. Зависимость проекции относительной криволинейной длины факела на ось Ox от числа Re :
 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 0,14\pi$ (25°); 3 – $\alpha = 0,28\pi$ (50°); 4 – $\alpha = 0,36\pi$ (65°);
 5 – $\alpha = 0,5\pi$ (90°); 6 – $\alpha = 0,75\pi$ (135°)

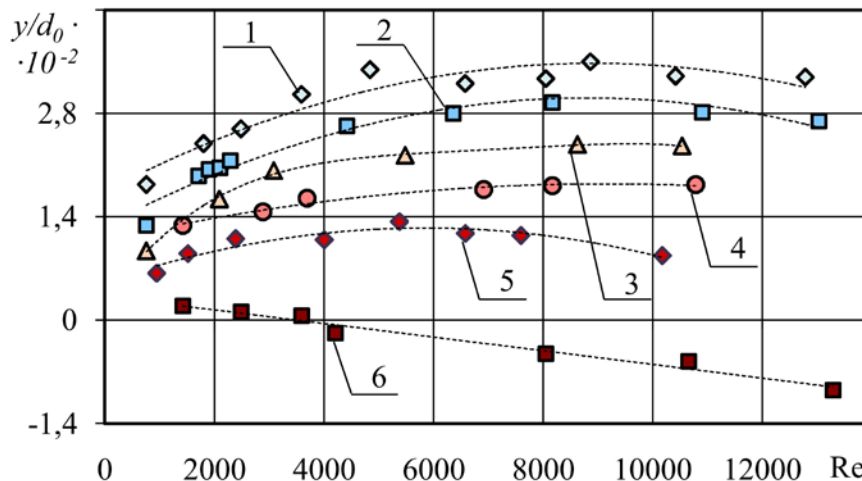


Рис. 5. Зависимость проекции относительной криволинейной длины факела на ось Oy от числа Re :
 1 — $\alpha = 0$; 2 — $\alpha = 0,14\pi$ (25°); 3 — $\alpha = 0,28\pi$ (50°); 4 — $\alpha = 0,36\pi$ (65°);
 5 — $\alpha = 0,5\pi$ (90°); 6 — $\alpha = 0,75\pi$ (135°)

Видно, что в области значений $7000 < Re < 9000$ наблюдается корреляция функций $x/d_0 = f(Re)$ и $y/d_0 = f(Re)$ при всех значениях углов α в диапазоне $0 < \alpha < 90^\circ$. Зависимость горизонтальной проекции относительной криволинейной длины факела от числа Re перестаёт прослеживаться при значениях Re от 8000 до границы срыва пламени для всех α . Вертикальная составляющая криволинейной длины имеет экстремум, смещающийся от $Re \approx 9000$ при $\alpha = 0$ до $Re \approx 5000$ при $\alpha = 90^\circ$. Увеличение угла между направлениями подъёмной силы и силы инерции струи более 90° сопровождается качественной перестройкой геометрии реагирующего диффузионного факела, выражающейся монотонным уменьшением функции $y/d_0 = f(Re)$ во всём диапазоне чисел Re .

Влияние свободной конвекции на геометрию реагирующего факела при увеличении начального импульса струи и постоянном его направлении относительно вертикали ($\alpha = 90^\circ$) приводит к монотонному возрастанию горизонтальной проекции x/d_0 и существенно нелинейной зависимости вертикальной проекции y/d_0 , обусловленной сменой режима истечения

струи, то есть переходом от ламинарного режима к турбулентному. Это проявляется в наличии ярко выраженного максимума y/d_0 при $Re \approx 5000$ с последующим резким сокращением высоты до значения $y/d_0 \approx 80$, соответствующего достижению верхней границы динамического диапазона устойчивого горения $Re \approx 15000$.

Обобщение известных и вновь полученных экспериментальных данных выполнено в виде уравнений подобия $Fr = f(Re, d_0/d_*, \alpha)$ для ламинарного и турбулентного режимов истечения, имеющих вид:

$$Fr_l = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot Re^{1,75} \cdot \left(\frac{d_0}{d_*}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{\alpha + 2\pi}{2\pi}\right)^{0,35}; \quad (3)$$

$$Fr_t = 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot Re^{1,63} \cdot \left(\frac{d_0}{d_*}\right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{\alpha + 2\pi}{2\pi}\right)^{0,65}, \quad (4)$$

где $200 \leq Re \leq 15000$, $0 \leq \alpha \leq \pi$.

Зависимость чисел Fr , однозначно определяющих абсолютную криволинейную длину факела, от чисел Re во всём динамическом диапазоне устойчивого горения показана на рис. 6.

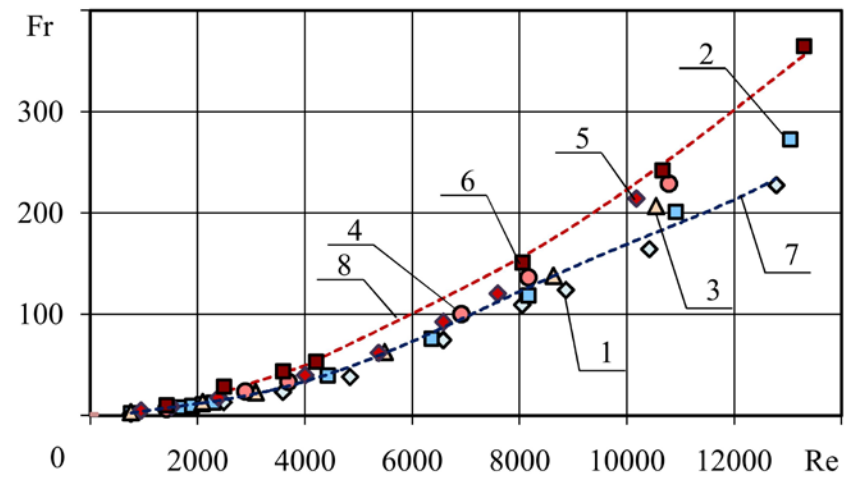


Рис. 6. Зависимость числа Fr от числа Re :
 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 0,14\pi$ (25°); 3 – $\alpha = 0,28\pi$ (50°); 4 – $\alpha = 0,36\pi$ (65°);
 5 – $\alpha = 0,5\pi$ (90°); 6 – $\alpha = 0,75\pi$ (135°); 7 – расчёт по уравнениям (1) и (2);
 8 – расчёт по уравнениям (3) и (4) для $\alpha = 0,5\pi$ (90°)

Видно, что кривая 7, построенная при помощи уравнений (1) и (2), адекватно описывает экспериментальные данные, соответствующие значениям $0 \leq \alpha < 25^\circ$, для всех режимов истечения. Увеличение α от значения $\alpha = 25^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ приводит к расслоению семейства кривых $Fr = f(Re)$ в области $Re \approx 8000$ и появлению явной зависимости числа Fr от угла α , которая эмпирически учтена в уравнениях (3) и (4) и показана для случая $\alpha = 135^\circ$ на рис. 6 (позиция 8).

Применение полученных уравнений подобия на стадии разработки технических устройств, использующих принцип горения диффузионных топливных струй в условиях несовпадения направлений подъёмной силы и начального импульса струи, позволяет на основе достаточно простой аналитической оценки заметно повысить эффективность проектирования и сократить его сроки.

Фотографии диффузионных реагирующих струй, истекающих из сопла форсунки диаметром $d_0 = 1,5$ мм при $Re = 7000$ в диапазоне углов $0 \leq \alpha \leq \pi$, показаны на рис. 7.

Приведённые критериальные уравнения (3), (4) и графические зависимости (рис. 2-6) дают возможность определения

оптимальных количественных значений начальных (α), геометрических (d_0, l, h, x, y) и теплофизических (Fr, Re) параметров, характеризующих истечение топливных струй. Основным критерием выбора отмеченных параметров является обеспечение минимального объёма факела, определяемого взаимным сочетанием его геометрических параметров (l, h, x, y) и необходимого для сжигания заданного расхода топлива.

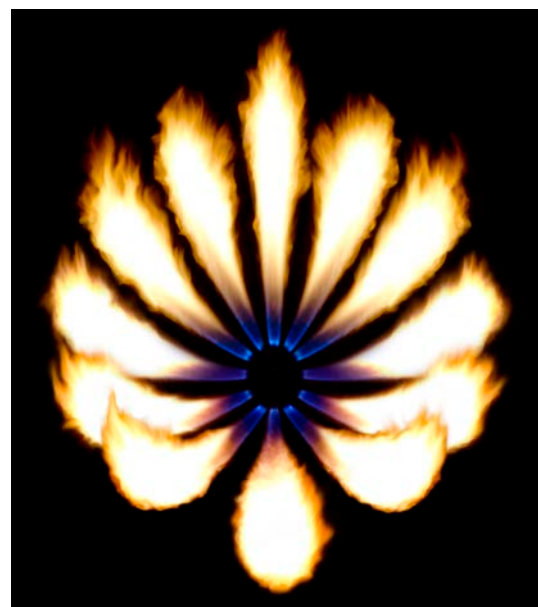


Рис. 7. Влияние конвекции на формирование струй

Выполнение отмеченного условия является важным с точки зрения интенсификации процессов теплопереноса, имеющих место в диффузионном пламени, и, как следствие, увеличения средней скорости протекания реакций горения [1, 4].

Заключение

Представленные экспериментальные данные по выгоранию диффузионных струй при ламинарном, переходном и турбулентном режимах истечения с

направлением начального импульса в диапазоне от 0° до 360° относительно вертикали обобщены в виде уравнений подобия, учитывающих влияние свободной конвекции на положение фронта пламени, геометрию и объём зоны горения. Даны рекомендации по выбору оптимальных начальных, геометрических и теплофизических параметров струи (Re , Fr , l , d_0 , h , α), обоснованы теплофизические особенности формирования диффузионных реагирующих струй.

Библиографический список

1. Законы горения / под общ. ред. Ю.В. Полежаева. М.: Энергомаш, 2006. 352 с.

2. Полежаев Ю.В., Мостинский И.Л., Габбасова Г.В. Диффузионное горение газовых струй в ламинарном и турбулентном режимах // Труды четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 3. М.: МЭИ, 2006. С. 297-300.

3. Гебхарт Б., Джалурия Й, Махад-

жан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. Т. 1. М.: Мир, 1981. 678 с.

4. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 740 с.

5. Евдокимов О.А., Гурьянов А.И. Исследование динамики выгорания топлива в камерах сгорания ГТД и устройствах энергетического назначения // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьёва. 2013. № 4 (27). С. 36-42.

Информация об авторах

Евдокимов Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва. E-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru. Область научных интересов: горение, горелочные устройства, камеры сгорания.

Гурьянов Александр Игоревич, доктор технических наук, профессор, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва. E-mail: marialex2004@mail.ru. Область научных интересов: горение, противоточные закрученные течения с горением, горелочные устройства, камеры сгорания.

EXPERIMENTAL STUDY OF FREE-CONVECTION FLAME PROPAGATION

© 2015 O. A. Yevdokimov, A. I. Guryanov

P.A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University,
Rybinsk, Russian Federation

The results of studying the burnout of diffusion jets flowing into stationary atmosphere in laminar, transitional and turbulent flows with the direction of the initial pulse in the range of angles α from 0° to 360° relative to the vertical are presented in the paper. Experimental data on the values of relative curvilinear flame length, its

projections on the axes Ox , Oy , the coordinates of the flame stabilization point in the range of Reynolds numbers from $Re = 500$ to $Re = 15000$ as functions of angle α are obtained. The experimental data are presented in the form of characteristic curves and summarized as criteria equations that take into account the effect of free convection in the framework of the theory of jet torch burning on the position of the flame front, the geometry and volume of the combustion zone. The results of photographing the process of jet combustion are presented. Recommendations on how to improve the combustion efficiency and the choice of optimal primary, geometrical and thermal parameters of the jet (Re number, Fr number, the relative length of the jet, the initial diameter of the jet, the position of the flame stabilization point, the angle relative to vertical) are given, and the thermophysical characteristics of diffusion reacting gas jet formation with account of free convection are shown.

Combustion, jet, free convection, flame front, fuel.

References

1. *Zakony goreniya / pod obshch. red. Yu. V. Polezhaeva* [Laws of burning. Under the general editorship of Yu.V. Polezhaev]. Moscow: Energomash Publ., 2006. 352 p.
2. Polezhaev Yu.V., Mostinskiy I.L., Gabbasova G.V. Diffusion combustion of gas jets in laminar and turbulent modes. *Proceedings of the Fourth Russian National Conference on Heat Transfer. In 8 volumes. V. 3.* Moscow: MPEI Publ., 2006. P. 297-300. (In Russ.)
3. Gebhart B., Dzhauriya J, Mahajan R., Sammak B. *Svobodno konvektivnye tehnika, teplo- i massoobmen* [Free-convection flows, heat and mass transfer. V. 1]. Moscow: Mir Publ., 1981. 678 p.
4. Schetnikov Ye.S. *Fizika goreniya gazov* [Physics of gas combustion]. Moscow: Nauka Publ., 1965. 740 p.
5. Yevdokimov O.A., Guryanov A.I. Research on born-out dynamics in GTE combustion chambers and other devices of power-production nature. *Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'eva.* 2013. №4 (27). P. 36-42. (In Russ.)

About the authors

Yevdokimov Oleg Anatolievich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Federal State Educational Institution of High Professional Education "P. A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University", Rybinsk, Russian Federation. E-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru Area of Research: combustion, burners, combustion chambers.

Guryanov Alexander Igorevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Federal State Educational Institution of High Professional Education "P. A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University", Rybinsk, Russian Federation. E-mail: mari-alex2004@mail.ru Area of Research: combustion, counter-current swirling combusting flows, burners, combustion chambers.