

УДК 536.46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЗАЖИГАНИЯ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

© 2015 А. Г. Егоров, А. С. Тизилов

Тольяттинский государственный университет

Представлены результаты определения границы зажигания турбулентного потока алюминиево-воздушной смеси, а также влияние таких параметров, как скорость потока, турбулентность, размер частиц алюминия на границы зажигания. Установлено, что с ростом начальной турбулентности очаг воспламенения под действием пульсации раздваивается, языки пламени выносятся в основной поток и там гаснут, тем самым увеличивая время зажигания основного потока смеси; с увеличением начальной турбулентности потока границы зажигания алюминиево-воздушной смеси расширяются, а также увеличивается скорость потока алюминиево-воздушной смеси; граница зажигания порошка алюминиево-магниевого сплава соответствует границе зажигания для камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей; наличие в зоне воспламенения частиц порошка алюминия мелкой фракции в значительной мере способствует расширению границы зажигания потока алюминиево-воздушной смеси. Также получено, что максимум скорости распространения пламени и тепловыделения для алюминиево-воздушной смеси наблюдается при составе смеси близком к стехиометрическому, как и для газозвушных смесей. Однако отличительной особенностью алюминиево-воздушной смеси является наличие второго максимума скорости распространения пламени и тепловыделения при составах смеси $\alpha < 0,3$. Полученные границы зажигания алюминиево-воздушной смеси лежат внутри области стабилизации пламени.

Воспламенение, алюминиево-воздушная смесь, границы зажигания, скорость потока, турбулентность.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-70-77

Как известно [1], зажигание топливовоздушной смеси (ТВС) обусловлено содержанием горючего и окислителя в определённых концентрационных пределах. При этом в случае достижения верхней или нижней концентрационной границы зажигания создаётся такой избыток окислителя или горючего, что основная часть энергии от источника воспламенения рассеивается, расходуется на подогрев избыточных количеств окислителя или горючего и скорость распространения фронта пламени падает до нуля.

Существование границ зажигания ТВС вызывается тепловыми потерями при горении. При разбавлении горючей смеси воздухом тепловые потери возрастают, скорость распространения пламени уменьшается и горение прекращается после удаления источника зажигания.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния таких параметров потока, как скорость, турбулентность и размер частиц, на границы

зажигания высокоскоростного потока алюминиево-воздушной смеси (ВП АВС). Испытания проводились на установке, схема рабочего участка и описание работы которой представлена в [2, 3].

Для инициирования очага зажигания в ВП АВС электроискровым разрядом использовалась штатная авиационная система зажигания. В ходе проведения исследования из трёх свечей зажигания, представленных на рис.1, была выбрана наиболее эффективная свеча поверхностного разряда СПН-4-3-Т мощностью $W = 0.05$ Дж.

Были установлены минимальные значения характерного размера стабилизатора ($H = D_K - d_{вх} = 14$ мм, где $d_{вх}$ – диаметр входного и D_K – диаметр выходного отверстия канала с внезапным расширением), скорости АВС ($U_0 = 40$ м/с) и расхода горючего ($G_{Al} = 3$ г/с), при меньших величинах которых зажигания основного потока АВС в камере сгорания не происходило.

Методика проведения эксперимента

При постоянной температуре, давлении и расходе воздуха на входе осуществлялось воспламенение АВС при различных значениях χ :

$$\chi = G_{Al}/G_B, \quad (1)$$

где G_B – расход воздуха г/с; G_{Al} – расход порошка алюминия, г/с.

Об успешности попытки воспламенения свидетельствует продолжение процесса горения после выключения источника зажигания. Максимальное время, отводимое для каждой попытки, составляет ≈ 10 с. Процедура повторялась для других значений массового расхода воздуха до тех пор, пока не была определена граница зажигания.



Рис. 1. Свечи зажигания:
1 – СП-30; 2 – СД-48 БСМ; 3 – СПН-4-3-Т

Полученные границы устойчивого зажигания представлены в виде зависимостей $\chi(G_B)$.

Расход порошка алюминия рассчитывался посредством фиксации значений начального веса бункера с порошком и веса бункера после проведения замера, также проводилась фиксация времени замера.

Зная вес бункера в начале и конце замера, т. е. общий расход порошка и время, за которое он был израсходован,

секундный расход горючего порошка алюминия вычислялся ПК по формуле

$$G_{Al} = G_{\theta}/\tau, \quad (2)$$

где G_{θ} – общий вес порошка, израсходованный за время τ .

Суммарная погрешность измерения алюминиевого порошка составляет $\sim 1,3\%$, температуры – $\sim 5\%$, расхода воздуха – $\sim 1,5\%$, скорости потока – $\sim 5\%$.

Результаты и выводы

Описание процесса распространения волны горения в гетерогенных металло-воздушных смесях является весьма сложной практической и теоретической проблемой. Термодинамические и кинетические закономерности, определённые для порошкообразных металлических горючих, во многих случаях не позволяют адекватно предсказать, а тем более количественно оценить поведение гетерогенных металлогазовых систем. Это, в частности, можно отнести к определению характеристики искрового зажигания при различных начальных параметрах потока АВС.

С этой целью было определено влияние скорости потока полидисперсной аэрозвеси на область воспламенения, представленное на рис. 2.

Как видно из рис. 2, максимум кривой $U_0(\chi)$ соответствует значению $\chi \approx 1.2$. Данное значение относительного расхода χ соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha \approx 0.1 - 0.2$, когда резко возрастает как тепловыделение, так и температура сгорания. Сопровождаемый экзотермическим эффектом процесс образования нитрида алюминия (AlN_K) вносит существенный вклад в суммарное тепловыделение и поддерживает устойчивое воспламенение и горение обеднённой кислородом смеси [4]. Максимальное значение скорости потока, при которой происходит воспламенение АВС, составляет порядка 300 м/с.

Рост интенсивности турбулентности газоздушных смесей затрудняет зажигание вследствие усиления теплоотвода от начального очага воспламенения (диапазон по составу смеси α сужается). Материалы киносъёмки показывают, что вначале от искры появляется небольшой очаг

пламени, видимо, частично ламинарной структуры, который переносится турбулентными пульсациями как целое. Затем, по мере роста очага, начинается его разрушение под действием пульсаций, в итоге воспламенения не происходит [5].

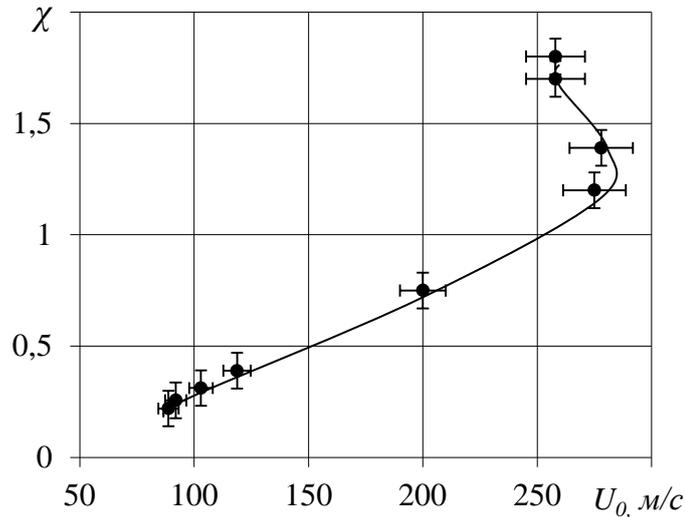


Рис. 2. Влияние скорости потока полидисперсной аэрозвеси на границы зажигания: состав смеси: 90% АСД-1 + 10% ПА-1; $D_K = 33$ мм; $T_0 = 293$ К; $P_0 = 0.1$ Мпа

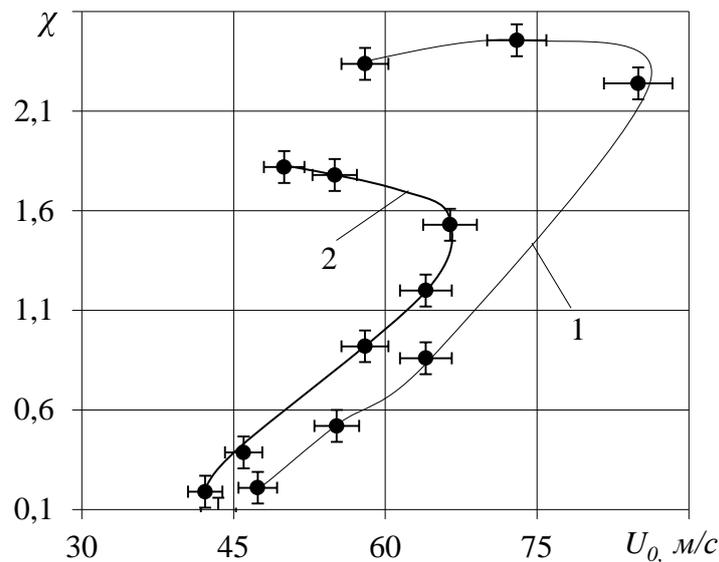


Рис. 3. Влияние U_0 и ϵ_0 на границы зажигания: порошок марки АСД-1; $D_K = 0.06$ м; $T_0 = 293$ К; $P_0 = 0.1$ МПа;
1 - с решёткой на $l_p = 20$ мм ($\epsilon_0 = 22\%$);
2 - с решёткой на $l_p = 57$ мм ($\epsilon_0 = 12\%$)

При искровом зажигании потока аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-4 с ростом начальной турбулентности очаг воспламенения под действием пульсаций раздваивается. Языки пламени выносятся в основной поток и там гаснут, тем самым увеличивая время зажигания основного потока аэрозвеси. Для аэрозвеси, содержащей частицы АСД-1, наоборот, увеличение начальной турбулентности благоприятно влияет на развитие процесса зажигания в зоне рециркуляции [6].

Поведение твёрдых частиц в турбулентных потоках является сложным физическим процессом, механизм реализации которого зависит как от концентрации частиц в потоке, так и от их размера. В турбулентных двухфазных течениях природа влияния массы твёрдых частиц на газообразный поток сложна, частицы могут выступать как своеобразные дискретные детурбулизаторы и как дестабилизаторы [7]. Установка в потоке турбулизирующей решётки для увеличения ε_0 при исследовании границ зажигания аэрозвеси частиц алюминия ещё более осложняет это влияние.

Характер влияния скорости U_0 и турбулентности ε_0 на границы зажигания ВП АВС представлен на рис. 3. В данных экспериментах варьировалось расстояние установки решёток до плоскости внезапного расширения l_p , а соответственно, и расстояние их от свечи зажигания. Из рис. 3 видно, что с ростом начальной турбулентности границы зажигания в потоке алюминиево-воздушной смеси с АСД-1 расширяются, а скорость потока АВС, при которой происходит воспламенение, увеличивается. Важнейшей характеристикой порошкообразных металлических горючих является размер частиц. Различают моно- и полидисперсные системы. К первым относятся системы, состоящие из частиц одинакового размера; их получение представляет сложную технологическую проблему. Для большинства промышленных порошков алюминия характерно статистическое распределение частиц по

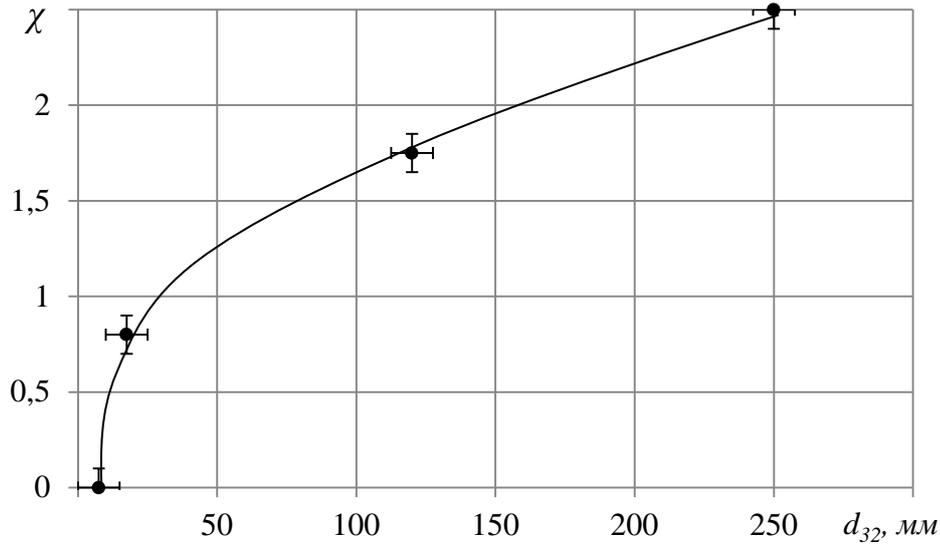
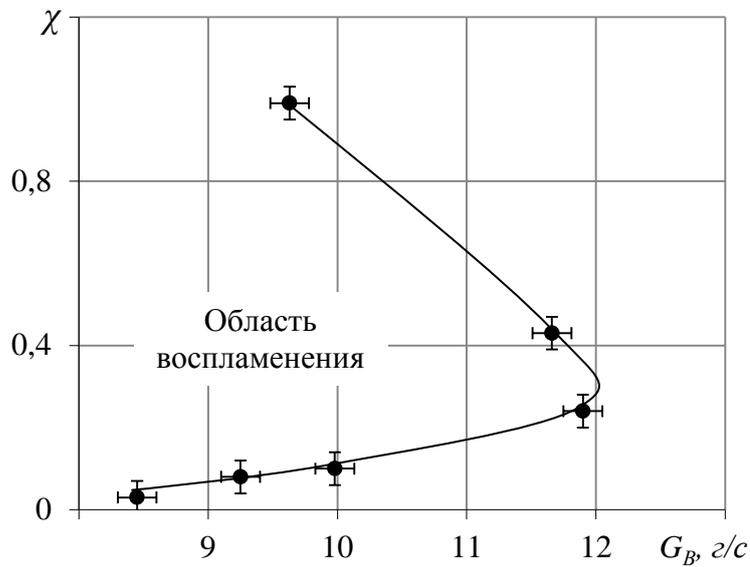
размерам. Характеристики воспламенения в камерах сгорания реактивных двигателей и энергетических установок, работающих на порошкообразном алюминии, зависят главным образом от присутствия частиц мелких фракций вблизи свечи зажигания и в первичной зоне горения на протяжении периода запуска. Поэтому влияние размера и формы частиц на характеристики воспламенения приобретает первостепенное значение.

На рис. 4 представлена зависимость $\chi = f(d_{32})$ на границе зажигания в потоке аэрозвеси, содержащей частицы алюминия сферической формы.

Такой характер зависимости $\chi = f(d_{32})$ обусловлен тем, что тепловые и диффузионные потоки в системе обратно пропорциональны размеру сгорающей частицы, а время сгорания пропорционально размеру сгорающей частицы в степени $1,5 \div 2$ [8].

Также были определены границы зажигания потока аэрозвеси частиц алюминиево-магниевого сплава марки АМД-50 (50 % алюминий + 50 % магний), которые представлены на рис. 5.

Полученная форма кривой границы зажигания соответствует форме кривой, ограничивающей типичную область такого рода для камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей [1]. Из рис. 5 видно, что для порошка марки АМД-50 надёжное воспламенение возможно при $\chi \approx 0.2 - 0.4$, что соответствует составу смеси $\alpha \approx 0.9 - 1.1$. Данный состав смеси является околостехиометрическим, и максимум значения границы устойчивого зажигания обусловлен достаточным для окисления количеством кислорода воздуха. На заключительном этапе для порошков алюминия марок АСД-1 и АСД-4 были получены границы зажигания в широком диапазоне $\chi \approx 0.1 - 3.5$ ($\alpha \approx 0.1 - 3.0$), представленные на рис. 6 (кривая 1). Также для сравнения на рис. 6 (кривая 2) приведена область стабилизации пламени $U_{cp}(\alpha)$ [2] ВП АВС для порошков марок АСД-1 и АСД-4 в диапазоне изменения $\alpha \approx 0.1 - 3.0$.

Рис. 4. Зависимость $\chi = f(d_{32})$ Рис. 5. Граница зажигания порошка марки АМД-50 в камере сгорания $D_K = 50$ мм

Как видно из рис. 6, граница зажигания имеет два максимума, при значениях $\chi \approx 2.1$, что соответствует «богатому» ($\alpha \approx 0.12$) составу смеси, и $\chi \approx 0.27$ – стехиометрическому ($\alpha \approx 1$) составу смеси. Зажигание аэрозвеси частиц алюминия при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 0.12$ происходит за счёт реакции азотирования [9], когда молекулы азота замещают молекулы кислорода в процессе окисления. При стехиометрическом составе смеси воспламенение происходит за счёт насыщения зоны реакции кислородом воздуха.

Для алюминиево-воздушной смеси, как и для газовой смеси [1], граница зажигания входит в область стабилизации пламени, как видно из рис. 6.

Полученные результаты исследования границы зажигания высокоскоростного потока алюминиево-воздушной смеси необходимо учитывать при создании реактивных двигательных установок, работающих на порошкообразном металлическом горючем, а также установки синтеза нанодисперсных порошков (оксидов, нитридов, боридов и т.д.).

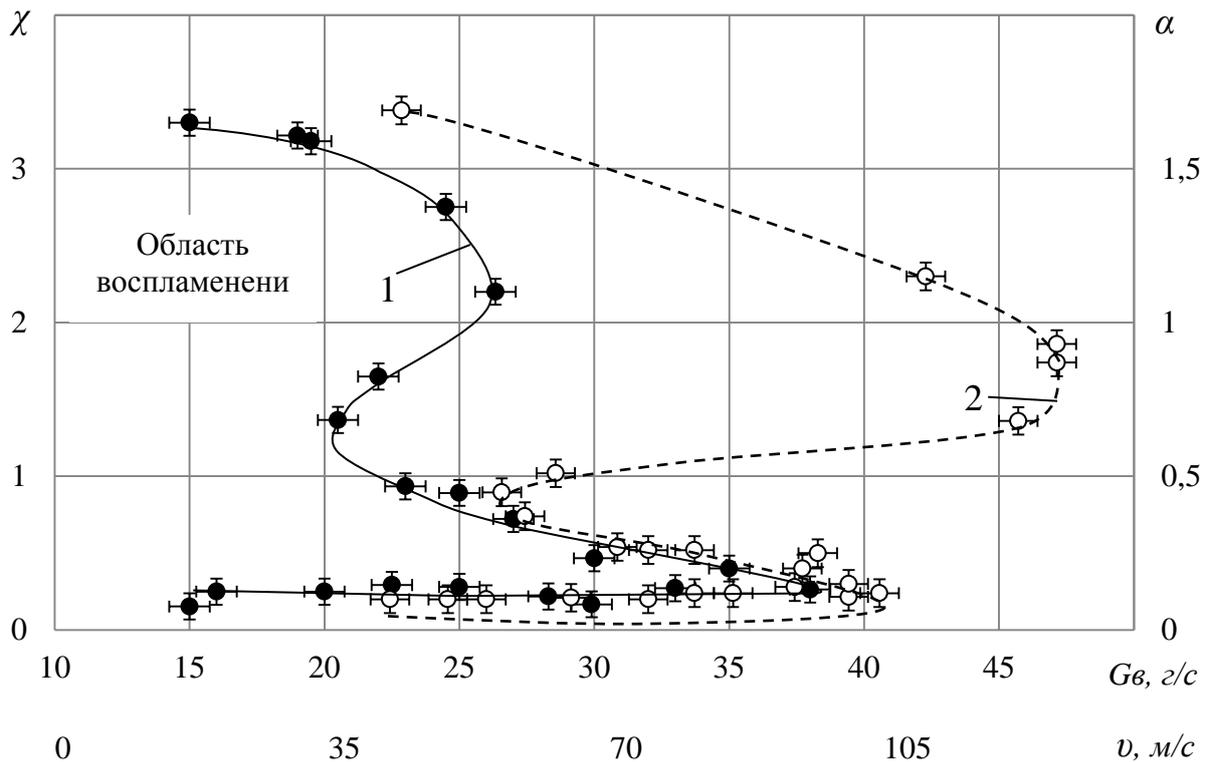


Рис. 6. Граница зажигания высокоскоростного потока алюминиево-воздушной смеси - 1 и область стабилизации пламени - 2:

$$T_0 = 293K; D_K = 40 - 80\text{мм}; U_0 = 40 - 120\text{ м/с}; \varepsilon = 5 - 22\%;$$

$$d_{32} = 7.4 \cdot 10^{-6} - 17.4 \cdot 10^{-6}\text{м}$$

Библиографический список

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
2. Егоров А.Г. О пределах распространения пламени в потоке алюминиево-воздушной смеси // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 3. С. 35-38. doi: 10.7868/S0207401X13010111
3. Егоров, А.Г., Пивнева С.В. Организация рабочего процесса в камерах сгорания двигательных и энергетических установок нового поколения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2006. № 2(10), часть 1. С. 382-387.
4. Ягодников, Д.А., Сухов А.В., Малинин В.И., Кирьянов И.М. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащённым металловоздушным смесям // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1990. № 1. С. 121-124.
5. Кумагаи С. Горение. М.: Химия, 1980. 256 с.
6. Егоров А.Г., Сафронов А.И., Иванин С.В., Тизилев А.С. Исследование теплового взрыва в потоке псевдожидкого топлива // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 5(29). С. 88-93.
7. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 639 с.
8. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
9. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. Екатеринбург – Пермь: УрО РАН, 2006. 264 с.

Информация об авторах

Егоров Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Тольяттинский государственный университет. E-mail: eag@tltsu.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в газодисперсных системах.

Тизилов Андрей Сергеевич, аспирант, Тольяттинский государственный университет. E-mail: andrewtizilov@mail.ru. Область научных интересов: механика гетерогенных сред, численное моделирование процессов в газодисперсных системах.

DETERMINING THE BOUNDARIES OF IGNITION OF ALUMINUM PARTICLE AEROSUSPENSION IN A HIGH-VELOCITY AIRFLOW

© 2015 A. G. Egorov, A. S. Tizilov

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

The results of determining the boundaries of ignition of a turbulent flow of aluminum-air mixture as well as the influence of parameters such as the flow rate, turbulence and particle size on the boundaries of ignition are presented in the paper. It has been found that as the initial turbulence increases the nucleation site for ignition splits under the influence of pulsation and flame tails are carried into the main stream and die out there, thus increasing the time of ignition of the main flow of the mixture; as the initial turbulence increases the boundaries of aluminum-air mixture ignition expand and the flow rate of the aluminum-air mixture increases; the boundary of ignition of a powdered aluminum-magnesium alloy corresponds to the boundary of ignition for combustion chambers of aircraft gas turbine engines; presence of fine aluminum powder particles in the area of ignition contributes greatly to the expansion of the boundaries of ignition of the flow of aluminum-air mixture. It has also been established that the maximum velocity of flame propagation and heat generation for aluminum-air mixture is observed when the mixture composition is close to stoichiometric, just as for gas-air mixtures. However, a distinguishing feature of aluminum-air mixture is the presence of the second maximum speed of flame propagation and heat generation for mixture compositions with $\alpha < 0.3$. The resulting boundaries of ignition of aluminum-air mixture lie within the area of flame stabilization.

Ignition, aluminum-air mixture, boundaries of ignition, flow rate, turbulence.

References

1. Lefebvre A. *Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD* [Processes in combustion chambers of gas turbine engines]. Moscow: Mir Publ., 1986. 566 p.
2. Egorov A.G., Tizilov A.S. Limits of flame propagation in an aluminum-air mixture flow. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2013. V. 7, no. 2. P. 133-136. doi: 10.1134/S1990793113010065
3. Egorov A.G., Pivneva S.V. Burning process in combustion chambers of new generation powerplants. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2006. No. 2 (10), part 1. P. 382-387. (In Russ.)
4. Yagodnikov D.A., Sukhov A.V., Malinin V.I., Kir'yanov I.M. The role of the nitriding reaction in the flame distribution in the over enriched metal air mixtures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 1990. No. 1. P. 121-124. (In Russ.)
5. Kumagai C. *Gorenie* [Burning]. Moscow: Khimiya Publ., 1980. 256 p.
6. Egorov A.G., Safronov A.I., Ivaniv S.V., Tizilov A.S. Investigation of thermal explosion in fuel flow fluidization. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 5(29). P. 88-93. (In Russ.)
7. Gorbis Z.R. *Teploobmen i gidromekhanika dispersnykh skvoznykh*

potokov [Heat transfer and fluid mechanics of disperse through flows]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 639 p.

8. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov J.V. *Gorenie poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Burning of powdered metals in active media]. Moscow: Nauka Publ., 1972. 294 p.

9. Malinin V.I. *Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskih goryuchikh* [Intrachamber processes in plants working on powdered metal fuels]. Ekaterinburg – Perm: Ural Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2006. 264 p.

About the authors

Egorov Alexander Grigoryevich, Doctor of Science (Engineering), Professor of Togliatti State University, Russian Federation. E-mail: eag@tltsu.ru. Area of Research: mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in gas-dispersion systems.

Tizilov Andrew Sergeevich, post-graduate student, Togliatti State University, Russian Federation. E-mail: andrewtizilov@mail.ru. Area of Research: mechanics of heterogeneous media, numerical modeling of processes in gas-dispersion systems.