

УДК 662.612.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА МАГНИЯ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ

М. Бидабади, С. Х. Йосефи, А. К. Поорфар, М. Хажилоу, С. Задсиржан

Иранский университет науки и технологии, 16887 Тегеран, Иран, Alirezapoorfar@iust.ac.ir

Проведено численное исследование горения пылевых частиц магния микронных размеров на основе модели источников тепла. Определена скорость распространения пламени при изменении концентрации пыли и диаметра частиц. Проведено сравнение результатов экспериментов, полученных при разном времени горения. Исследована минимальная энергия зажигания как функция концентрации пыли для частиц разного диаметра. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: магниевое пылевое облако, гетерогенное горение, распространение пламени, время горения, минимальная энергия зажигания.

ВВЕДЕНИЕ

Горение металлической пыли — сложная научная задача, имеющая большое практическое значение. Поскольку горение неорганических частиц является высокоэкзотермичной химической реакцией, практическое применение таких частиц возможно во многих промышленных процессах, включая авиакосмическую технику. Используемые в настоящее время твердые ракетные топлива обычно содержат металлы в качестве высокоэнергетической добавки, а газообразный CO_2 , наряду с H_2O , часто является для них главным окисляющим компонентом. Магний как добавка обладает важным преимуществом перед другими металлами, например, такими, как алюминий, поскольку воспламеняется значительно легче алюминия, особенно в среде, содержащей CO_2 . Подробное изучение горения магния в атмосфере CO_2 актуально в свете вероятного использования этого процесса в ракетных двигателях при исследовании Марса [1].

Исследование горения металлических частиц началось в 1960-е годы и продолжается до настоящего времени. Проблема математического моделирования горения металлических частиц представляет существенный интерес для различных отраслей промышленно-

сти. В работе [2] описаны в основном точечные и частично представлены распределенные модели зажигания мелких металлических частиц с низкотемпературным окислением, протекающим на поверхности частиц при пренебрежении диссипацией тепла в газовой фазе. Распределенная математическая модель воспламенения частиц магния с учетом гетерогенной химической реакции и участка термического влияния частицы на газ разработана в [3] в одномерной постановке. Распространение пламени в воздушно-дисперсионных средах, содержащих горючие частицы, теоретически рассматривалось во многих статьях. Большинство из них базируется на непрерывном одномерном подходе к количественному описанию характеристик дисперсной фазы. Разработанные излучательные [4] и гибридные кондуктивно-излучательные модели [5] успешно предсказывают нормальную скорость стационарного пламени. Изучение эффективных параметров распространения пламени в смесях магниевой пыли с воздухом [6] показало, что скорость пламени зависит от теплопроводности и теплоемкости смеси. В используемой в [6] модели принимаются во внимание нестационарный характер потока тепла на поверхность частицы и неоднородность распределения температуры внутри частицы.

Дискретный подход к моделированию горения твердых топлив начал развиваться с 1980-х годов. В работе [7] путем сравнения скоростей пламени, рассчитанных как по непрерывной, так и по дискретной модели, установ-

© Bidabadi M., Yosefi S. H., Poorfar A. Kh., Hajilou M., Zadsirjan S., 2014.

School of Mechanical Engineering, Department of Energy Conversion, Combustion Research Laboratory, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran 16887, Iran.

лено влияние дискретной природы источников тепла, рассматриваемых как твердое ракетное топливо, на распространение пламени в бедных газовых суспензиях частиц алюминия и циркония. В работе [8] показано влияние дискретности на гетерогенные пламена и на пределы распространения пламени для случаев частиц правильной и случайной формы.

В настоящем исследовании численно изучается влияние размера частиц и концентрации пыли на распространение пламени частиц магния микронного размера. Использована термическая модель на основе дискретных источников тепла. Метод дискретных источников тепла позволяет создать модель горения пыли от момента воспламенения до конечного состояния, включая стационарное распространение пламени, его гашение или даже взрыв. По сравнению с большим количеством моделей, созданных для описания горения частиц и учитывающих перенос массы и химическую кинетику (что усложняет модель), в данной термической модели применен новый подход к теоретическому моделированию горения неорганических пылевых частиц: модель основана на механизме кондуктивного теплопереноса.

ТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Сложность анализа горения двухфазного пылевого облака связана с многочисленностью процессов: нагрев частиц, испарение, смешивание с окислителем, воспламенение, горение и погасание частиц в пылевом облаке. Горение пыли зависит не только от физических и химических свойств топлива, но и от формы, среднего размера и распределения частиц. Взаимодействие между частицами в смеси всегда делает пылевое горение нестабильным. В процессе распространения пламени в пылевых облаках доминирует теплоперенос. Излучательный теплоперенос оказывает очень сложное действие на поведение пылевого горения, которое еще не понято до конца. Установлено [9], что отношение разницы температур, связанной с процессами теплопроводности, к разности температур, обусловленной излучательными процессами, для частиц магния равно 629. Это отношение известно также как число Штарка, характеризующее роль теплопередачи за счет теплопроводности относительно излучательной теплопередачи. Излучательный теплоперенос исчезает в предельном случае прозрачной среды. С другой стороны, по мере приближения этого

отношения к большим значениям теплоперенос в среде осуществляется только за счет теплопроводности. Противоположный крайний случай, когда отношение стремится к нулю, соответствует полностью излучательному теплопереносу. Учитывая, что для магния это отношение велико, можно пренебречь излучательным теплопереносом при горении.

При поступлении минимального количества энергии от системы зажигания к пылевому облаку температура частиц в первом слое увеличивается до температуры воспламенения. По мере того как частицы начинают гореть, они ведут себя как источники тепла в системе пылевого облака и вызывают подъем температуры в соседних областях. Увеличение температуры в других частицах вычисляется как сумма термических эффектов от сгоревших и горящих частиц. Увеличение температуры частиц в зоне предварительного разогрева за счет только теплопроводности выражается на основе принципа суперпозиции.

Созданная термическая модель основана на гетерогенном горении в трехмерном пространстве и включает в себя следующие допущения:

- 1) частица имеет сферическую форму, диаметр пламени остается постоянным и равным диаметру частицы;
- 2) термические свойства среды и частиц не зависят от температуры;
- 3) существуют равные и постоянные промежутки между частицами, распределенными в пылевом облаке;
- 4) выделение энергии при горении одиночной частицы происходит с постоянной скоростью;
- 5) излучательным теплопереносом в облаке пыли магния можно пренебречь и рассматривать только теплоперенос по механизму теплопроводности.

В работе [10] приведены два экспериментальных соотношения для определения времени горения одиночной частицы магния микронного размера:

$$\tau = 4.2 \cdot 10^{-2} d_0^{1.36}, \quad (1)$$

$$\tau = 4 \cdot 10^{-2} d_0^{1.43}. \quad (2)$$

В работе [11] экспериментальные данные по зависимости температуры воспламенения от исходного размера частиц магния представлены следующим образом:

$$T_{ig}(d_0) = 1203.9394 - 20.9751d_0 +$$

$$+ 1.3057d_0^2 - 0.0539d_0^3 + 1.2157 \cdot 10^{-3}d_0^4 - \\ - 1.3723 \cdot 10^{-5}d_0^5 + 6.0702 \cdot 10^{-8}d_0^6, \quad (3)$$

где d_0 — исходный размер частиц магнезия, мкм.

Для моделирования горения одиночной частицы и распределения температуры по пространству и времени в ее домене используется уравнение энергии в сферических координатах

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T_a(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_a(r, t)}{\partial t} \quad (4)$$

с граничными и начальными условиями

$$k_p A \frac{\partial}{\partial r} T_a(r, t) = \dot{q} H(\tau - t), \quad r = r_p,$$

$$T_a(\infty, t) = 0,$$

$$T_a(r, 0) = 0.$$

Здесь r — радиус частицы, м, $T_a(r, t) = T(r, t) - T_\infty$, T_∞ — температура окружающей среды, α — коэффициент температуропроводности, $H(x)$ — функция Хевисайда, \dot{q} — скорость выделения тепла с поверхности одиночной частицей, определяемая по формуле [12]

$$\dot{q} = Ak_p(T_f - T_\infty)r_p^{-1}, \quad (5)$$

A — площадь поверхности, м², k_p — коэффициент теплопередачи частицы, кДж/(К·м²), τ — время горения, с.

В [13] получено распределение температуры частиц в пространстве и времени по всему домену:

$$T_a(r, t) = (T_f - T_\infty) \frac{r_p}{r} \left[\operatorname{erf} \sqrt{\frac{(r - r_p)^2}{4\alpha t}} - \right. \\ \left. - H(t - \tau) \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{(r - r_p)^2}{4\alpha(t - \tau)}} \right], \quad (6)$$

$$T_s = \sum_i \sum_j \sum_k T_a(i, j, k)(r_{i,j,k}, t_{ig,i}), \quad (7)$$

где T_a — пространственно-временное распределение температуры вокруг одиночной горячей частицы и над ней, величина T_s характеризует общий эффект от горящих и сгоревших частиц и показывает среднюю температуру среды вокруг частицы в зоне предварительного разогрева, $T_\infty = 300$ К и $T_f = 3400$ К

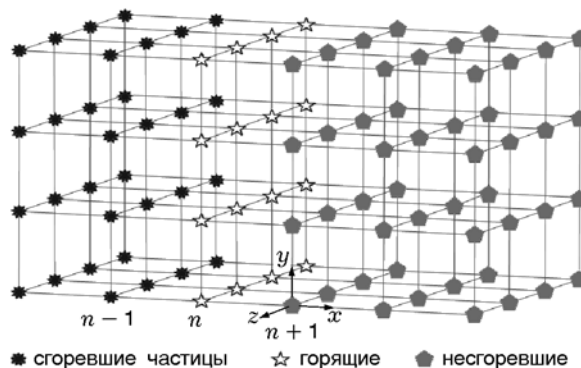


Рис. 1. Пространственное распределение частиц в пылевом облаке:

слой $n - 1$ — сгоревшие частицы, слой n — горящие частицы, слой $n + 1$ — частицы, подвергающиеся предварительному разогреву [13]

[14]. Пространство между целевой частицей и каждой из частиц, расположенных на i, j, k , задается уравнением

$$r_{i,j,k} = L \sqrt{i^2 + j^2 + k^2}. \quad (8)$$

Расстояние между двумя смежными слоями L определяется уравнением, предложенным в [15]:

$$L = (\pi d_p^3 \rho_p / 6 C_d)^{1/3}. \quad (9)$$

Здесь ρ_p — плотность частицы, C_d — концентрация пылевого облака, d_p — диаметр частицы.

Скорость распространения пламени определяется как отношение расстояния между двумя смежными слоями к разнице их времен воспламенения [7]. Пространственное распределение частиц в пылевом облаке представлено на рис. 1.

Время воспламенения одиночной частицы в слое может характеризовать время воспламенения слоя в целом. Считается, что частица расположена в начале локальной системы координат [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Алгоритм системы команд показан на рис. 2. Согласно алгоритму вслед за выделением энергии системой зажигания вычисляется температура первого слоя в рассматриваемом положении. Время, когда температура частиц

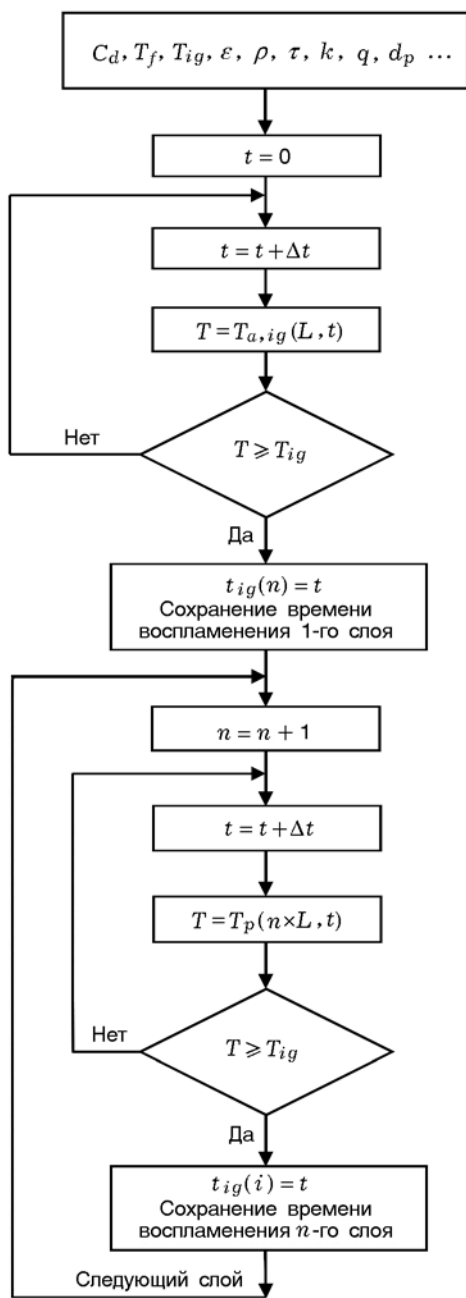


Рис. 2. Блок-схема вычисления времени воспламенения частиц магния

первого слоя достигает температуры воспламенения, фиксируется как время воспламенения первого слоя, вычисления продолжаются, и определяется время воспламенения других слоев.

На предварительный подогрев слоев, следующих за первым слоем ($n > 1$), влияет горение предшествующих слоев, в дополнение к

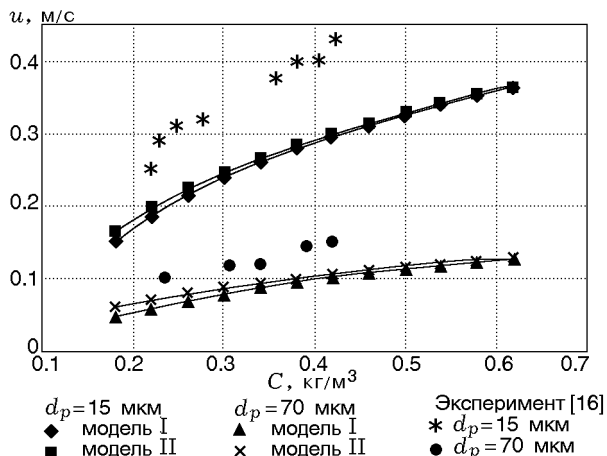


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени от концентрации пыли для частиц магния диаметром 15 и 70 мкм

воздействию зажигающей системы. Время, когда температура последующего слоя достигает температуры воспламенения, регистрируют как время воспламенения этого слоя. Скорость распространения пламени определяют делением расстояния L между двумя смежными слоями на разность времен воспламенения этих двух слоев. Если предположить, что единственный механизм распространения пламени — теплопроводность, увеличение температуры частицы будет функцией коэффициента температуропроводности α . Чем больше эта величина, тем скорее смежные слои достигают температуры воспламенения, и скорость распространения пламени возрастает.

На рис. 3 показано изменение скорости распространения пламени в зависимости от концентрации пыли для частиц магния диаметром 15 и 70 мкм. С ростом концентрации пыли скорость распространения пламени увеличивается. Из полученных результатов видно, что при низкой концентрации пыли скорости пламени в случае расчета времени по выражениям (1), (2) (модели I, II) заметно различаются, но при больших значениях концентрации это различие уменьшается. Темп увеличения скорости с ростом концентрации пыли выше для частиц диаметром 15 мкм, чем для частиц диаметром 70 мкм. Более того, полученные результаты показывают разумное согласие с экспериментальными данными [16]. Действительно, измеренная в [16] скорость пламени выше рассчитанной по описываемой модели. Такие расхождения часто наблюдались для пылевых

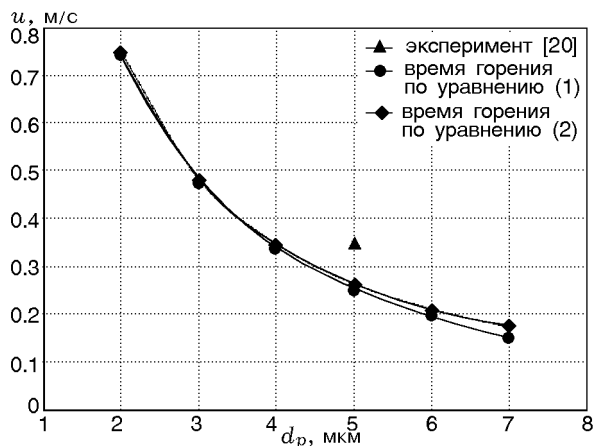


Рис. 4. Влияние исходного размера частиц на нормальную скорость пламени в воздушной суспензии частиц магния

пламен [17, 18]. Исходя из того, что измерения достаточно надежны, расхождения объясняют либо потерями тепла из пламени излучением в окружающие участки, либо неполным сгоранием [19].

Скорость распространения пламени частиц пыли разного диаметра иллюстрирует рис. 4. Видно, что результаты расчета по представленной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными [20]. Необходимо отметить, что экспериментальные данные относятся к богатой магниевой-воздушной суспензии с концентрацией 0.2 кг/м^3 . Поэтому в целях сравнения данных концентрация пыли в модели принята равной 0.2 кг/м^3 .

Как следует из рис. 4, при временах горения, рассчитанных по уравнениям (1) и (2), скорости распространения пламени различаются очень мало. Можно заключить, что, как и при увеличении диаметра частиц, скорость распространения пламени уменьшается.

Минимальная энергия воспламенения слоя (E_{\min}) в предполагаемой дискретной среде как функция концентрации пыли для частиц разного размера показана на рис. 5. Видно, что с ростом концентрации пыли минимальная теплота воспламенения уменьшается и по достижении определенной концентрации существенно уже не меняется. Стехиометрическая концентрация частиц магния составляет 0.422 кг/м^3 [9]. Более того, можно заключить, что при большой концентрации пыли минимальное количество тепла, необходимое для воспламенения определенного слоя в рамках данной моде-

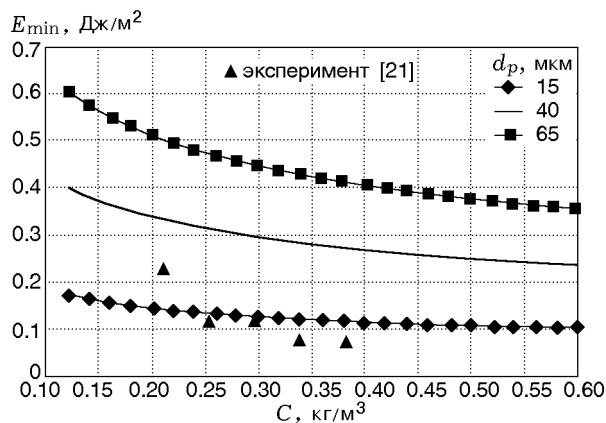


Рис. 5. Зависимость минимальной энергии воспламенения от концентрации пыли для частиц магния различного диаметра

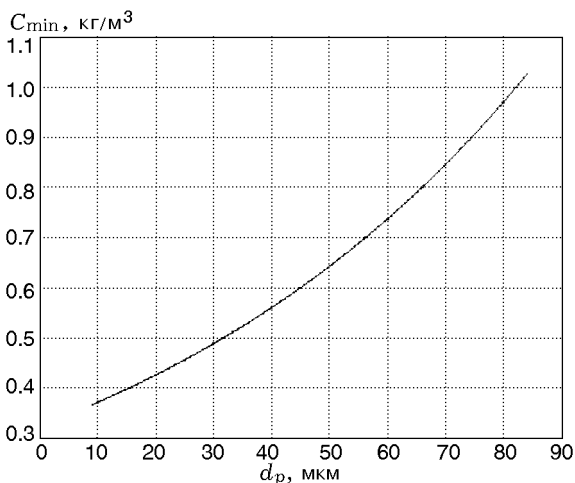


Рис. 6. Зависимость минимальной концентрации пыли от диаметра частиц магния

ли, меньше, чем в случае стехиометрической и малой концентрации пыли. Также можно сказать, что с уменьшением размера частиц минимальная энергия воспламенения уменьшается. Результаты, полученные для частиц диаметром 15 мкм, хорошо согласуются с экспериментальными данными [21].

На рис. 6 минимальная концентрация пыли, необходимая для воспламенения системы, представлена как функция диаметра частиц в предлагаемой модели. Видно, что с увеличением размера частиц минимальная концентрация растет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье выполнено численное исследование распространения пламени в среде с частицами магния микронного размера, которые рассматриваются как пространственно дискретные источники. Был составлен компьютерный алгоритм для изучения различных аспектов распространения пламени в пылевом облаке частиц магния микронных размеров. Скорость распространения пламени в богатых магниевых-воздушных суспензиях зависит от размера частиц — уменьшается с увеличением их диаметра. Результаты представленной модели находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Минимальная энергия воспламенения зависит от концентрации пыли и имеет тенденцию к снижению с уменьшением размера частиц. Вместе с тем, при высокой концентрации пыли минимальное количество энергии, требуемое для воспламенения определенного слоя в представленной модели, ниже, чем при стехиометрической и малой концентрации пыли. Минимальная концентрация пыли, при которой система воспламеняется, зависит от размера частиц: с увеличением диаметра частиц для воспламенения требуется большая минимальная концентрация пыли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зенин А. А., Кузнецов Г. П., Колесников В. И.** Горение частиц магния в невесомости и при конвекции // *Хим. физика*. — 2008. — Т. 27, № 8. — С. 13–22.
2. **Федоров А. В., Фомин В. М., Гостеев Ю. А.** Динамика и воспламенение газозвесей. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
3. **Попов В. Н., Федоров А. В., Шульгин А. В.** Численное моделирование воспламенения частицы магния в неоднородном тепловом поле // *Мат. моделирование*. — 2007. — Т. 19, № 6. — С. 109–117.
4. **Тодес О. М., Гольцикер А. Д., Горбульский Ю. Г.** Нормальная скорость пламен в аэродисперсных системах // *Докл. АН СССР*. — 1972. — Т. 205, № 5. — С. 1083–1086.
5. **Шевчук В. Г., Безродных А. К., Бойчук Л. В., Кондратьев Е. Н.** О механизме ламинарного пламени в аэрозвесах металлических частиц // *Физика горения и взрыва*. — 1988. — Т. 24, № 2. — С. 85–89.
6. **Bidabadi M., Fereidoon J., Broumand M., Razaghi M.** Study of effective parameters for flame propagation in magnesium dust-air mixture // *Intern. J. Energy & Technol.* — 2011. — V. 3, N 21. — P. 1–7.
7. **Goroshin S., Lee J. H. S., Shoshin Y.** Effect of the discrete nature of heat sources on flame propagation in particulate suspensions // *Symp. (Intern.) on Combustion*. — 1998. — V. 27. — P. 743–749.
8. **Tang F. D., Higgins A. J., Goroshin S.** Effect of discreteness on heterogeneous flames: Propagation limits in regular and random particle arrays // *Combust. Theory and Modell.* — 2009. — V. 13, N 2. — P. 319–341.
9. **Bidabadi M.** An experimental and analytical study of laminar dust flame propagation: Thesis (PhD) / McGill University. — 1995.
10. **Валов А. Е., Кустов Ю. А., Шевцов В. И.** Спектроскопическое исследование горения одиночных частиц Mg в воздухе и углекислом газе // *Физика горения и взрыва*. — 1994. — Т. 30, № 4. — С. 29–35.
11. **Cassel H. V., Liebman I.** Combustion of magnesium particles II. Ignition temperatures and thermal conductivities of ambient atmospheres // *Combust. Flame*. — 1963. — V. 7, N 1. — P. 79–81.
12. **Hanai H., Kobayashi H., Niioka T.** A numerical study of pulsating flame propagation in mixtures of gas and particles // *Proc. Combust. Inst.* — 2000. — V. 28. — P. 815–822.
13. **Bidabadi M., Zadsirjan S., Mostafavi S. A.** Propagation and extinction of dust flames in narrow channels // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2013. — V. 26. — P. 172–176.
14. **Fereidooni J.** Analytical solution of magnesium particles combustion: M. Sc. Thesis. — 2010.
15. **Sabourin J. L., Asay B. W., Yetter R. A., Risha G. A., Son S. F.** Effect of nano-aluminum and fumed silica particles on deflagration and detonation of nitromethane // *Propel. Explos. Pyrotech.* — 2009. — V. 34. — P. 385–393.
16. **Ballal D. R.** Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity // *Proc. Roy. Soc. A: Math., Phys. Eng. Sci.* — 1983. — V. 385, N 1788. — P. 21–51.
17. **Han O. S., Yashima M., Matsuda T., Matsui H., Miyake A., Ogawa T.** A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles behaviour // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2000. — V. 13. — P. 449–457.
18. **Proust C.** A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2006. — V. 19. — P. 104–120.
19. **Broumand M., Bidabadi M.** Modelling combustion of micron-sized iron dust particles during flame propagation in a vertical duct // *Fire Saf. J.* — 2013. — V. 59. — P. 88–93.
20. **Деревяга М. Е., Стесик Л. Н., Федорин Э. А.** Режимы горения магния // *Физика горения и взрыва*. — 1978. — Т. 14, № 5. — С. 8–10.

21. **Ballal D. R.** Quenching of quiescent dust clouds further studies on the ignition and flame // Proc. Roy. Soc. A: Math., Phys. Eng. Sci. — 1983. — V. 385, N 1788. — P. 1–19.

*Поступила в редакцию 12/X 2013 г.,
в окончательном варианте — 17/II 2014 г.*
